

平成26年度 委託業務成果報告書

粘土鉱物に対する放射性物質への吸脱着機構解明と  
減容法の開発

平成27年2月

独立行政法人物質・材料研究機構

本報告書は、独立行政法人物質・材料研究機構  
が実施した委託業務「粘土鉱物に対する放射性物  
質への吸脱着機構解明と減容法の開発」の成果を  
取りまとめたものです。

## 目次

1. プロジェクトの目的
2. プロジェクトの実施計画
3. Cs 特異吸着サイトのナノ材料科学による検討
  - 3.1 TOF-SIMS を用いた粘土鉱物への安定 Cs 吸着状態の可視化 (北澤)
  - 3.2 分析電子顕微鏡を用いた Cs 安定吸着サイトの探索
  - 3.3 X線技術による Cs-バーミキュライトの検討
  - 3.4 ESR 法による Cs-スメクタイトの検討
4. 粘土鉱物・ゼオライトの化学的・バルク状態での吸脱着機構に関する検討
  - 4.1 合成バイデライトー白雲母系粘土鉱物の Cs 吸着挙動
  - 4.2 風化変性度の異なる黒雲母の Cs の吸着・脱着挙動
  - 4.3 変性天然粘土鉱物における Cs 吸着特性脱着挙動の検討
  - 4.4 ゼオライト系鉱物中の Cs および Sr 吸着・不溶出化・長期安定性に関する検討
  - 4.5 低結晶質粘土鉱物・非晶質物質における Cs 吸着特性脱着挙動の検討 (鈴木・森本)
5. 粘土鉱物への Cs 吸着の理論的アプローチ
  - 5.1 イオン交換に伴うモンモリロナイトの膨潤挙動の変化
6. 実汚染土壌の特徴およびその吸着・除去・減容の検討
  - 6.1 寄洲堆積物および津波堆積物における放射性セシウムの垂直分布
  - 6.2 汚染ため池堆積物の特徴の検討 (森本・鈴木)
  - 6.3 パッシブ除染に適する天然材料の最適化・除染現場への適用検討
  - 6.4 高度分級技術の要素抽出・減容化基盤技術の検討
7. まとめおよび今後の課題
8. 成果の外部への発表
9. 活動 (運営委員会等の活動等)
10. 実施体制

## 1. プロジェクトの目的

### 1. 1 はじめに

福島第一原子力発電所の事故により大量の放射性物質が放出され、発電所の建屋・敷地のみならず発電所外の地域、東北および関東地方の生活環境（水、土壌、森林、建物等）が汚染された。事故当初に放出された主な放射性物質は、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$  等である。 $^{131}\text{I}$  は半減期が約 8 日と短いため、現在では検出されることはない。一方、 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  の半減期は約 30 年と約 2 年であり、放射線量と半減期の観点から、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$  が主な回収・除去・除染の対象となっている。環境中の放射性セシウムの多くは土壌等の微粒子に比較的強固に吸着し、その微粒子とともに定着もしくは移行すると考えられている。従って、放射性物質で汚染された地域の復興には、汚染した農地・土壌や用水・排水等をより効率的に除染すると同時に、除染で発生する廃棄物の減容化が必要となる。

そのために、本プロジェクトにおいては、先端的ナノ材料科学により放射性 Cs 等と粘土鉱物等の土壌成分との吸着・脱着機構を解明し、その可視化イメージングを図り、合理的・科学的に正しい除染・減容プロセスの開発・技術レファレンスに資する。さらに、各種精密合成粘土鉱物・天然鉱物・メソポア材料・ゼオライト系材料による放射性 Cs 等の吸脱着メカニズムを化学的・バルク状態での解明し、除染・減容処理後の化学的安全性の評価に資する。一方で、汚染環境中での Cs 等の吸着土壌・粘土鉱物の特性解明およびその動態も検討し、先端的ナノ材料科学および化学的・バルク状態の解明を踏まえ、汚染土壌の減容方法・分級方法の最適化・化学処理法の開発を推進し、減容化基盤技術・包括的処理・保管に関する技術レファレンスに資することを目的とする

### 1. 2 プロジェクトの課題・概要

この状況において、独立行政法人物質・材料研究機構は、独立行政法人日本原子力研究開発機構の委託研究として「粘土鉱物に対する放射性物質への吸脱着機構解明と減容法の開発」を進めた。そのために、後述の実施体制（第 10 章）に詳細に示すように、独立行政法人物質・材料研究機構を中心として、国立大学法人北海道大学、国立大学法人東北大学、公立大学法人首都大学東京、学校法人金沢工業大学、国立大学法人宮崎大学、独立行政法人産業技術総合研究所の 5 大学・2 独法から研究チームが構成された。

研究チームは、福島原発事故で喫緊の課題となっている環境中の放射性物質の効率的な除染・減容化を実現するために、特に既に大量に環境中に飛散しているにもかかわらず、半減期が長く、経時による減少が見込めない放射性セシウムを主たる対象として開発を進めた。具体的には、以下の 2 つのサブテーマを設定し、放射性物質の粘土鉱物などへの吸着挙動解明により、汚染土壌の減容方法の開発、および除染指針策定に資することを目的として推進した。

#### ① 先端的ナノ材料科学による放射性元素の粘土鉱物への吸脱着機構の解明とその可視化イメージング

放射性 Cs は、土壌中の粘土鉱物に ppt～ppb オーダーで選択的に吸着されていることが知られているが、放射性 Cs の空間的分布および物理的・化学的状态はいまだ十

分には解明されていない。

本サブテーマでは、放射性同位元素（Cs など）の粘土鉱物等の土壌成分への吸脱着機構を解明するため、先端的ナノ材料科学による Cs 特異吸着サイトの構造解析、Cs 特異吸着の可視化イメージングなどを遂行し、「粘土鉱物に対する放射性物質への吸脱着機構解明と減容法の開発」に資することを目的とした。

具体的には、

- 1) 土壌・粘土鉱物中の Cs 吸着サイトの特定・分布に関する検討
  - ・ TOF-SIMS を用いた粘土鉱物への安定 Cs 吸着状態の可視化
  - ・ 分析電子顕微鏡を用いた Cs 安定吸着サイトの探索
  - ・ X 線技術による Cs-バーミキュライトの検討
  - ・ ESR 法による Cs-スメクタイトの検討
- 2) 粘土鉱物への Cs 吸着の理論的アプローチ
  - ・ イオン交換に伴うモンモリロナイトの膨潤挙動の変化

の課題を設定し委託研究を進めた。

上記先端的ナノ材料科学による成果は、除染、廃棄物減容化の最良の包括的処理・保管法・基盤技術の開発に対して、土壌に吸着したセシウム（Cs）等を最終的にどのように回収するべきか、Cs 等と土壌成分等との吸着・脱着メカニズムの詳細なナノ材料科学的解明、合理的かつ科学的に正しい除染・減容プロセスの開発・技術レファレンスへの確立に資する。

## ② 精密合成鉱物・天然鉱物への放射性元素の化学的・バルク状態での吸脱着機構解明および汚染廃棄物減容法の開発

減容化基盤技術・包括的処理・保管に関する技術レファレンスの確立のために、各種粘土鉱物（スメクタイト・バーミキュライト・マイカ・タルク等）の精密合成（化学組成・結晶度・イオン交換能を制御）し、これらによる放射性元素の溶液化学的実験によるバルクの状態分析の視点から吸着・脱着機構の解明を遂行する。具体的には、様々な化学的条件下、すなわち温度、Cs 濃度、pH、共存物質存在の有無等での吸着・脱着実験、誘導結合プラズマ(ICP)質量分析システムによる分析等を検討する。熱力学的準安定・安定挙動、カイネティクスも考慮して検討を進める。さらに、同様の手法を各種天然鉱物（福島県産出粘土鉱物・低結晶質粘土鉱物・非晶質粘土鉱物、および福島県外産出粘土鉱物・低結晶質粘土鉱物・非晶質粘土鉱物、メソポア材料およびゼオライト系材料）にも適用する。これらの成果は、吸脱着データベースとして構築し、発信する。また、各種合成粘土鉱物および天然鉱物は、Cs 等の吸脱着に優れた標準試料として JAEA に提供する。

これらの知見を基に、分級、土壌等の焼却、安全管理への工学的手法の汎用知の収集と検証を推進し、上記「放射性元素の粘土への吸脱着機構の TOF-SIMS 等の分析システムによる解明」等を活用し、Cs 等の吸脱着の科学的なメカニズム解明に基づいた除染・土壌廃棄物の減容化プロセス等の高度化に取り組む。

さらに、汚染地域での吸着粘土鉱物・材料の特性把握（安定性の長期将来予測、

溶液化学的安定性など)、汚染農地土壌および森林土壌中の鉍物の特徴解明、汚染溜め池底土の特徴の検討、環境中での動態の検討、仮置き場・中間貯蔵施設の安全性を想定しての検討、飯舘村・浪江町の現場における実証検討、ホット・コールドの比較検証などを推進する。一方で、湿式分級を想定した除染・減容法の要素技術(汚染土壌の評価・診断法の検討、処理後の化学的安定性の評価、フィールド試験を踏まえた問題点とその対策の最適化)の検討を進め、福島環境除染に特化した「福島型分級システム」の要素技術の抽出し、その除染・減容化技術レファレンスの次年度以降での展開を支援する。具体的には、土壌・粘土鉍物中の Cs 吸着サイトの特定・分布に関する検討として、

- ・ 汚染ため池堆積物の特徴の検討と放射性 Cs 含量とその分布
  - ・ 高度分級技術の要素抽出・減容化基盤技術の検討
  - ・ パッシブ除染に適する天然材料の最適化・除染現場への適用検討
  - ・ 福島県及び南東北地方における汚染土壌の分布とその特徴に関する検討
- の課題を設定し委託研究を進めた。

## 2. プロジェクトの実施計画

### 2.1 実施計画概要

プロジェクトは、後述の実施体制（第10章）に詳細に示すように、独立行政法人物質・材料研究機構を中心として、国立大学法人北海道大学、国立大学法人東北大学、公立大学法人首都大学東京、学校法人金沢工業大学、国立大学法人宮崎大学、独立行政法人産業技術総合研究所の5大学・2独法から構成された。

研究チームは、福島原発事故で喫緊の課題となっている環境中の放射性物質の汚染除去を実現するために、特に既に大量に環境中に飛散しているにもかかわらず、半減期が長く、経時による減少が見込めない放射性Csを主たる対象として計画を進めた。特に放射性物質の粘土鉱物などへの吸着挙動解明により、汚染土壌の減容方法の開発、および除染指針策定に資することを目的として推進した。

具体的には、実施計画1)に従い、独立行政法人物質・材料研究機構の総合的推進のもと、サブテーマ「先端的ナノ材料科学による放射性元素の粘土鉱物への吸脱着機構の解明とその可視化イメージング」に関しては、①Cs特異吸着サイトのナノ材料科学による検討、および②粘土鉱物へのCs吸着の理論的アプローチを進めた。また、サブテーマ「精密合成鉱物・天然鉱物への放射性元素の化学的・バルク状態での吸脱着機構解明および汚染廃棄物減容法の開発」に関しては、放射性元素の化学的・バルク状態での吸脱着機構解明のために、①粘土鉱物・ゼオライトの化学的・バルク状態での吸脱着機構に関する検討、汚染廃棄物減容法の開発に関しては、①実汚染土壌の特徴およびその吸着・除去・減容の検討、及び②福島県飯館村での実施研究（3回）を進めた。

#### 1) プロジェクトの総合的推進

独立行政法人物質・材料研究機構では、本プロジェクト全体を円滑に運営していくため、「先端的ナノ材料科学による放射性元素の粘土鉱物への吸脱着機構の解明とその可視化イメージング」および「精密合成鉱物・天然鉱物への放射性元素の化学的・バルク状態での吸脱着機構解明および汚染廃棄物減容法の開発」に対しての特性試験の指示・確認、追加実験方針の策定・再確認、結果のとりまとめを行い、参画各機関の連携・調整にあたった。さらに、全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、情報共有と実験方針決定に必要なプロジェクトの関係者が出席する共同研究ミーティングを開催した。プロジェクトで得られた成果については、日本粘土学会主催 粘土科学討論会(シンポジウム)・公開市民講座、東北大学金属研究所共同利用ランダム構造セミナー、さらには一般向けの講演会(計4回:鹿児島大学、長崎大学、九州大学、北海道大学)等にて積極的に公表し、今後の展開に資した。

#### 2) Cs特異吸着サイトのナノ材料科学による検討

環境中の放出された放射性Csは、土壌中では、その主要成分である粘土鉱物に選択的に極微量(ppt~ppbオーダー)吸着されていることが知られている。しかしながら、放射性Csの空間的分布および物理的・化学的状态はいまだ十分には解明されていない。

独立行政法人物質・材料研究機構では、放射性同位元素(Csなど)の粘土鉱物等の土壌成分への吸脱着機構を解明するため、先端的ナノ材料科学によるCs特異吸着サイトの構造解析、Cs特異吸着の可視化イメージングなどを遂行し、「粘土鉱物に対する

放射性物質への吸脱着機構解明と減容法の開発」に資する。先端的ナノ材料科学手法としては、ラジオオートグラフィーシステムを活用した TOF-SIMS（高性能二次イオン質量分析装置）・ラジオオートグラフィーシステムを活用した高分解能透過型分析電子顕微鏡システム、可搬型分析走査電子顕微鏡システム、各種 X 線分析システム（NIMS、高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設）、XRF-Raman コンフォーカルマイクロアナライザー、ゲルマニウム半導体検出器用遮蔽システムを用いた。具体的には、①TOF-SIMS を用いた粘土鉱物への安定 Cs 吸着状態の可視化、②分析電子顕微鏡を用いた Cs 安定吸着サイトの探索、③X 線技術による Cs-バーミキュライトの検討、④ESR 法による Cs-スメクタイトの検討を行った。

### 3) 粘土鉱物への Cs 吸着の理論的アプローチ

汚染土壤中での放射性イオンの振る舞い、物理的・化学的な吸着・脱着・溶脱特性の解明を目指し、計算科学による理論的アプローチを進めた。独立行政法人物質・材料研究機構では、北海道大学と共同で汚染土壤を粘土鉱物と水（水分子）から形成される系と見做す大胆な近似を行い、組成も理想化したモデルを考え、特に本年度は、イオン交換に伴うモンモリロナイトの膨潤挙動の変化に関する検討を行った。

### 4) 精密合成鉱物・天然鉱物への放射性元素の化学的・バルク状態での吸脱着機構解明

顕在化している放射性物質による多種・多様な汚染に対しての取り組みの重要な課題の一つとして、土壤中の粘土鉱物・ゼオライトへのセシウム等の放射性元素の物理的・化学的吸着・脱離メカニズムの解明がある。

独立行政法人物質・材料研究機構では、放射性 Cs の粘土鉱物への吸着メカニズムを材料科学・粘土科学の立場より詳細に検討するためには、検討すべき「標準物質」となる粘土鉱物が必須であるとの視点より、標準物質として①化学組成・層電荷・結晶度を制御した合成粘土鉱物、特に本年度は「合成バイデライトー白雲母系粘土鉱物」に注目した。さらに②変質度・風化度の異なる天然粘土鉱物・風化黒雲母に注目し、これらの特徴づけとその Cs 吸着挙動を検討した。

公立大学法人首都大学東京では、選択的にセシウムイオンを吸着可能であると考えられる「自然界中での風化雲母粘土鉱物」に注目し、雲母粘土鉱物に化学処理を施し、人工風化をさせ優れた吸着能を有する吸着剤の作成を目指すとともに、その吸着メカニズムの解明を試みた。

学校法人 金沢工業大学では、汚染水処理に用いられている各種ゼオライト系鉱物に対して、その処理・処分・減容化法として、ゼオライト細孔内の Cs および Sr の様々な環境下における脱着・不溶出化の検討、焼却灰のゼオライト転換による Cs および Sr の不溶出化の検討、焼却における Cs および Sr の脱着メカニズムの解明や溶出挙動・不溶出化メカニズムの検討を進めた。

独立行政法人産業技術総合研究所では、表層土壤の主成分の一つである非晶質物質および低結晶性鉱物（アロフェンやイモゴライトなど）に注目し、その特徴付け・吸脱着特性の検討と共に、仮置き場・中間貯蔵施設の安全性・減容化に結び付く知見

を提供することを目的とした。

#### 5) 実汚染土壌の特徴およびその吸着・除去・減容の検討

合理的かつ科学的に正しい除染・減容プロセスの開発・技術レファレンスの確立のためには、汚染地域での吸着粘土鉱物・材料の特性（安定性の長期将来予測、溶液化学的安定性など）を知ることが極めて重要である。また、これらの汚染物質の除去と共に、汚染農地土壌および森林土壌中の鉱物の特徴解明、汚染溜め池底土の特徴の検討、環境中での動態の検討、仮置き場・中間貯蔵施設の安全性を想定しての検討が必須であり、そのために飯舘村・浪江町の現場における実証検討、ホット・コールドの比較検証などを進めた。一方で、湿式分級を想定した除染・減容法の要素技術（汚染土壌の評価・診断法の検討、処理後の化学的安定性の評価、フィールド試験を踏まえた問題点とその対策の最適化）の検討を進め、福島環境除染に特化した「福島型分級システム」の要素技術の抽出し、その除染・減容化技術レファレンスへの展開を検討した。

国立大学法人東北大学では、環境中での動態、特に河川における放射性Csの動態解明として、福島県西部から新潟市に流下し、日本海に注ぐ阿賀野川の下流域と阿武隈山地から福島県中通りの阿武隈川に合流する移川下流のダム付近から採取した寄洲堆積物についての検討を行った。

独立行政法人産業技術総合研究所では、プロジェクト参画機関（独立行政法人物質・材料研究機構、国立大学法人北海道大学、国立大学法人宮崎大学）および独立行政法人国際農林水産業研究センター、財団法人電力中央研究所との共同により、福島県飯舘村のため池底土における放射性セシウムの深度方向の分布状況を調査するとともに、堆積した底土の季節変化についても測定を行い、ため池底土における放射性セシウムの堆積状況を把握し、農業用人工池を利用した放射性セシウム回収システムへの取り組みを進めた。

国立大学法人北海道大学では、放射性セシウムの存在形態に応じたパッシブ除染に適する材料として珪藻土に着目してきた。特に、実溪流における懸濁粒子のパッシブな捕獲を実施して捕獲粒子のキャラクタリゼーションを行うとともに、先行して検討されている鉱山廃水のパッシブトリートメントの方法をレビューして、除染現場に適用可能なパッシブ除染システムを検討した。

国立大学法人宮崎大学では、重金属類土壌汚染対策・鉱山廃水処理対策を基に、汚染土壌中のCs吸着特性に関する結果を踏まえた汚染土壌減容化に関する高度化を進めた。さらに、技術レファレンスの構築に向け、既存の技術情報を収集・整理・分類し、それに本プロジェクトの基礎研究成果を含め情報発信する方法について検討した。

## 2.2 実施結果概要

研究チームは、実施計画1)に従い、独立行政法人物質・材料研究機構の総合的推進のもと、サブテーマ「先端的ナノ材料科学による放射性元素の粘土鉱物への吸脱着機構の解明とその可視化イメージング」および「精密合成鉱物・天然鉱物への放射性元素の化

学的・バルク状態での吸脱着機構解明および汚染廃棄物減容法の開発を進めた。その結果概要は、目次および 1. 2 プロジェクトの課題・概要に示した各サブテーマ内の課題に従って以下に示す。

#### 2.2.1 Cs 特異吸着サイトのナノ材料科学による検討

##### 1) TOF-SIMS を用いた粘土鉱物への安定 Cs 吸着状態の可視

飛行時間型 2 次イオン質量分析法 (TOF-SIMS) は、ppm 程度の濃度の微量分析法の 1 つであるが、その空間分解能は 0.1 マイクロメートル程度、質量分解能は 12,000  $m/\Delta m$  と非常に優れている。残念ながら、TOF-SIMS を用いた粘土鉱物に吸着する Cs の局所分析の検討例はほとんどなかったが、上記の TOF-SIMS の持つ有用性を考えると TOF-SIMS を用いた除染研究は検討するに値すると思われる。そこで、当該年度では、昨年度に引き続き、膨潤性の 2:1 型粘土鉱物の 1 つであるバーミキュライトを Cs 吸着のモデル物質として選び、TOF-SIMS を使った安定 Cs の 3 次元可視化を試みた。

##### 2) 分析電子顕微鏡を用いた Cs 安定吸着サイトの探索

従来から、Cs の粘土鉱物への吸着機構として、Si 四面体サイト層の間（膨潤層）に取り込まれる比較的弱い吸着と、これと異なる強い吸着の 2 種類あることが、各種の実験で示唆されている。これまで、強い吸着を示すサイト（安定吸着サイト）の候補として、層構造がほつれてできた欠陥サイト（フレイドエッジ：frayed-edge）が想定されてきているが、顕微学的に構造と Cs 吸着の相関が確かめられた例はなく、本課題では、分析電子顕微鏡を用いて、層構造と Cs 吸着分布との比較を行ってきた。安定吸着サイトを洗い出すため、今回、 $K^+$ や $NH_4^+$ を共存させ Cs が吸着しにくい環境下を作り、その違いを比較した。その結果、いずれの条件でも、Cs は Ti が多く K、Fe が少ないバンド（原子層の集まり）に偏析することが確認された。Ti 濃度が、Cs と K の吸着選択性に影響を与えているだけではなく、元来、Ti 濃度によって Cs 吸着特性に違いが現れることが示された。

##### 3) X 線技術による Cs-バーミキュライトの検討

セシウム吸着バーミキュライトについて得られた X 線データをもとに、セシウム吸着メカニズムと構造の関連を検討するうえでの留意事項の整理を行った。また、粘土学会標準試料「クニピア」（天然モンモリロナイト、クニミネ工業）および、層状ケイ酸ナトリウム（アイラアイト）のセシウム吸着実験も行った。

##### 4) ESR 法による Cs-スメクタイトの検討

Cs 特異吸着サイトのナノ材料科学による検討には、様々な取り組みからの検討が必要と考えられる。本委託研究においても TOF-SIMS・分析電子顕微鏡さらには各種 X 線技術による検討を進めた。本研究では、あらたなアプローチとして ESR（電子スピン共鳴）法による Cs を含む各種合成スメクタイトを検討し、スメクタイト中の Cs の存在状態、他の競合陽イオンの存在下での選択性に関して検討した。

### 2.2.2 粘土鉱物へのCs吸着の理論的アプローチ

膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトの層間イオンの安定性について、分子動力学 (Molecular dynamics, MD) 計算から評価した。一部の長半減期低発熱性廃棄物 (TRU 廃棄物) に高濃度に含まれる硝酸イオンは、地下深部の処分環境下では、還元されてアンモニウムイオン ( $\text{NH}_4^+$ ) に変化する可能性がある。アンモニウムイオンは他の 1 価の陽イオン ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ) と比較して、スメクタイト中の層間イオンとして交換されやすく、 $\text{NH}_4^+$ 型のスメクタイトが、放射性廃棄物処分場において期待されている低透水性や低拡散性を保持できるのかを調査する必要がある。また  $\text{NH}_4^+$ イオンがスメクタイトに与える影響を原子スケールから研究することで、放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の物性予測に役立つ基礎を構築することが必要となる。本研究では、 $\text{NH}_4^+$ 型モンモリロナイトと K 型モンモリロナイトの膨潤挙動を MD 計算により評価することで、モンモリロナイト中の  $\text{NH}_4^+$ イオンの性質を明らかにすることを目的と。

### 2.2.3 精密合成鉱物・天然鉱物への放射性元素の化学的・バルク状態での吸脱着機構解明

#### 1) 合成バイデライトー白雲母系粘土鉱物のCsの吸着挙動

放射性Csの天然環境における吸着・固定メカニズムを材料科学・粘土科学の立場より解明するためには、検討すべき「標準物質」となる粘土鉱物が必須である。本研究では、材料科学の面から、その化学組成・層電荷・結晶度を精密に制御した合成粘土鉱物、二八面体型粘土鉱物 (バイデライトー白雲母系) を水熱条件下で合成し、その粘土鉱物学的特徴づけとそのCs吸着挙動を検討した。また、これらの標準物質は、他の先端的材料科学的手法による放射性Csの粘土鉱物への吸着メカニズムの解明に供し、除染・減容化に貢献できると考えている。

#### 2) 風化黒雲母のCsの吸着挙動

福島県内の農地土壌に比較的多く含まれる風化黒雲母は、福島第一原発事故により環境中に放出された放射性Csを吸着・固定する物質として注目されている。福島県田村郡小野新町周辺に産出する変質度・風化度の異なる「風化黒雲母」に注目し、昨年度の予備的検討を踏まえ、それらのCs吸着挙動を詳細に検討した。その結果、Cs吸着特性と風化黒雲母の風化度との相関を明確にすると共に、風化黒雲母中に含まれるパーミキュライト、ハイドロバイオタイト (規則型雲母/パーミキュライト混合層鉱物) および積層不整を示す黒雲母が、Cs吸着挙動に関して重要な役割を果たしていることを示した。

#### 3) 変性天然粘土鉱物におけるCs吸着特性脱着挙動の検討

自然界中で雲母粘土鉱物は風化して層間カチオンが一部水和イオンに交換されている。この雲母粘土鉱物は水和された層間でセシウムイオンを強く吸着できるが、吸着容量が低いという欠点がある。また、その特異的な吸着メカニズムは詳しくは解明されていない<sup>2)3)4)</sup>。本研究ではこの雲母粘土鉱物に化学処理を施し、人工風化をさせ優れた吸着能を有する吸着剤の作成を目指すとともに、その吸着メカニズムの解明を

試みた。本研究では、フロゴパイト、バーミキュライト、バイオタイト、サポナイトなどの粘土鉱物を選択し、その構造と吸着能の相関について検討した。その結果、粘土鉱物の電荷密度とセシウムイオンの捕捉能に強い相関があることを見出した。特に、フロゴパイト、バーミキュライトにおいて極めて強いセシウムイオン固定化能を見出し、そのメカニズムについて考察を加えた。

#### 4) ゼオライト系鉱物中の Cs および Sr 吸着・不溶出化・長期安定性に関する検討

ゼオライト系吸着材の Cs<sup>+</sup>、Sr<sup>2+</sup>等の吸着、焼却による減容化法および長期安定化法に関する基礎研究を継続して実施している。本年度は、Cs<sup>+</sup>吸着天然ゼオライト（クリノプチロライト(CLI)、モルデナイト(MOR)）、石炭飛灰のアルカリ水熱処理によるゼオライト転換を利用した Cs<sup>+</sup>安定化に関する検討、ゼオライト／アパタイト(HA)複合体による Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の吸着及び焼成による安定化、Cs<sup>+</sup>吸着 MOR／HA 複合焼結体の作製とその溶液安定性に関する評価を行った。本研究により天然ゼオライト及び石炭飛灰からアルカリ水熱処理して得られたアナルサイム系ゼオライトが水熱処理過程での Cs<sup>+</sup>保持能が高く、高い溶液安定性を示すことが明らかになった。Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収・安定化研究では、天然 CLI に HA を形成した天然 CLI／HA 複合体を用いることで Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収が可能なが明らかになった。また 1100℃以上の焼成により、長石や石英などに相変化（安定鉱物化）し、水溶液中への溶出を抑制できることが明らかになった。Cs<sup>+</sup>の長期安定化に関する研究では常圧で焼結した Cs<sup>+</sup>吸着 MOR／HA 複合焼結体が、セメント固化（簡易セメントで作製）したものと比較して高い溶液安定性を示すことが明らかになった。

#### 5) 低結晶質粘土鉱物・非晶質物質における Cs 吸着特性脱着挙動の検討

低結晶質粘土鉱物・非晶質物質における Cs 吸着特性脱着挙動の検討を行うため、福島県浪江町の花崗岩の風化土壌と、天然品および合成品の低結晶質粘土鉱物・非晶質物質を用いて、塩化セシウムを用いた吸着試験および、吸着後に純水を用いた脱離試験を行った。福島県浪江町の花崗岩風化土壌における Cs 吸着試験および脱離試験を行った結果から、天然土壌において、Cs を相当量吸着するとともに、純水ではあまり Cs は離脱せず、かつ非晶質物質にもある程度の量が吸着されていることが明らかとなった。さらに非晶質物質における Cs 吸脱着試験を行ったところ、天然アロフェンは 90%程度の吸着率であったが、合成品および天然ゼオライトにおいては、いずれも 98%以上の吸着率を示していた。そして純水における脱離試験においては、天然アロフェンが 5%程度の脱離率を示したが、合成品および天然ゼオライトは 2%以下の脱離率を示す結果となった。以上の結果から、非晶質物質においても Cs を相当量吸着し、純水では溶け出さないほどの吸着力を有していることが明らかとなった。

### 2.2.4 実汚染土壌の特徴およびその吸着・除去・減容の検討

#### 1) 寄洲堆積物および津波堆積物における放射性セシウムの垂直分布

河川における放射性 Cs の動態解明の一端として、福島県西部から新潟市に流下し、日本海に注ぐ阿賀野川の下流域と阿武隈山地から福島県中通りの阿武隈川に合流する

移川下流のダム付近から採取した寄洲堆積物について昨年を引き続いて検討した。

その結果、両地点とも寄洲堆積物における粘土含量当たりの放射性 Cs 濃度は原発事故直後に高く、その後は次第に低下する傾向であった。その傾向は河川を流下する微粒子を集めて排出される浄水場発生土の放射性 Cs 濃度の時間変化においても同様であった。即ち、阿賀野川下流域の阿賀野川浄水場と満願寺浄水場では、原発事故後早い時期の取水に由来する発生土で高い放射性 Cs 濃度が観測されたが、その後は低下し、高い値は観測されていない。また、砂サイズの黒雲母風化物には移川ダムの下層でのみ放射性 Cs が明らかに検出されたが、その他の層の黒雲母風化物には放射線の検出は極めてわずかであり、河川内で一旦粘土粒子等に保持された放射性 Cs が他の土壌粒子との間で均一化する度合いは少ないと見られた。

研究地点を変えて、宮城県沿岸部の津波堆積物とその下の残存土における放射性 Cs の垂直分布を県南部から亘理-山元、名取、仙台に渡って 17 地点で測定した。再表層の泥質堆積物の放射性 Cs 濃度が高く、残存土ではほとんど検出されない場合が多かった。原発事故地点に近い亘理-山元では名取、仙台より泥質堆積物の放射性 Cs 濃度が高い傾向であった。また、泥質堆積物の垂直断面における放射性物質の濃度は斑点状に高い場所と層状にごく薄く存在する部分があり、沈着した放射性セシウムの形態に 2 種類あることが示唆された。

## 2) ため池堆積物の放射性 Cs 含量とその分布 汚染ため池堆積物の特徴の検討

福島県飯舘村にある 6 箇所のため池において、20~30cm の堆積物コアを採取し、深さ方向の  $^{134}\text{Cs}$  および  $^{137}\text{Cs}$  濃度、含水率および鉍物組成を測定した。その結果、ため池の底土における深度方向の放射性 Cs 濃度の分布について、深度が深くなるにつれ放射性 Cs 濃度が低くなる傾向と、深度が深くなってもほぼ一定の放射性 Cs 濃度を示す 2 つの傾向が確認された。

## 3) パッシブ除染に適する天然材料の最適化・除染現場への適用検討

昨年度までは、放射性セシウムの存在形態に応じたパッシブ除染に適する材料として珪藻土に着目し、パッシブ除染に適する天然材料としての可能性について検討した。その結果、

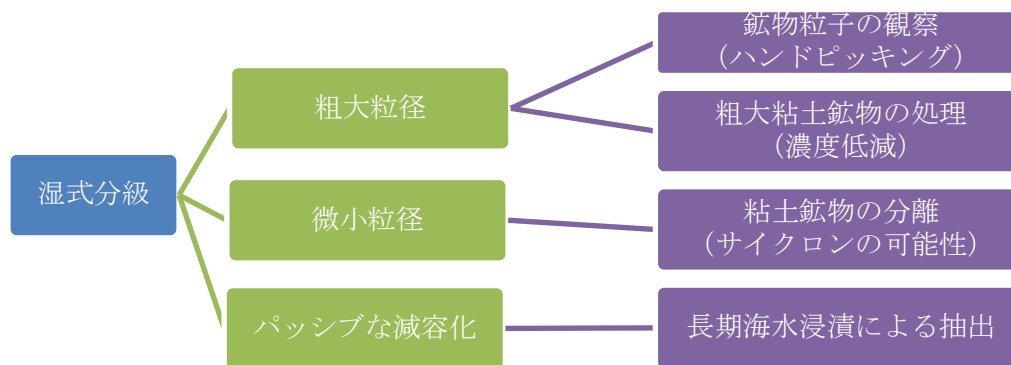
- ① 焼成稚内珪藻土のメソポアにより、懸濁粘土粒子のフィルトレーション効果が高いこと。
- ② 焼成珪藻土に捕獲された粘土画分の鉍物組成はバーミキュライトやカオリナイトであり、これらのどちらかが放射性セシウムの運搬媒体であること。
- ③ 焼成珪藻土のメソポアに捕獲された懸濁粘土粒子は容易に回収することができ、粘土画分捕獲のために設置された焼成珪藻土は再生可能であること。
- ④ より流速の早い溪流などに焼成珪藻土を設置したところ、ほとんど粘土画分の捕獲ができず、その捕獲のためには設置条件を検討しなければならないこと。

が明らかとなった。これを受けて、本年度は、実溪流における懸濁粒子のパッシブな捕獲を実施して捕獲粒子のキャラクタリゼーションを行うとともに、先行して検討さ

れている鉱山廃水のパッシブトリートメントの方法をレビューして、除染現場に適用可能なパッシブ除染システムを検討した。その結果、F3 および F4 の全ての試料でバーミキュライトやカオリナイトが含まれていること、F4 に比べ F3 には雲母の明瞭なピークが認められること、すべての試料に石英、斜長石、雲母、角閃石等の花崗岩あるいは花崗閃緑岩起源のケイ酸塩鉱物も含まれることが明らかとなった。様々な研究から、放射性 Cs を固定化して運搬媒体になっている鉱物はバーミキュライトや風化雲母であることが明らかになっているので、最も細かい F4 を捕獲するだけでは F3 に含まれている雲母の除去が十分行われなくなる。昨年度の報告書に示したように、焼成珪藻土で捕獲された細粒粘土粒子は、採集場所が異なるものの、初期の珪藻土には含まれていないバーミキュライトとカオリナイトであった。F3 および F4 にはそれ以外のケイ酸塩鉱物も含まれているので、焼成珪藻土は選択的にバーミキュライトとカオリナイトを捕獲している可能性があることが明らかとなった。また、鉱山廃水のパッシブトリートメントにおいて設置されている石灰岩の設置例をまとめることができた。

#### 4) 高度分級技術の要素抽出・減容化基盤技術の検討

土壌中の粒子単位に着眼した放射性セシウムの分布傾向をバルクレベルで明らかにすることと、それを受けた減容化の実施的側面からの分級法のみには依らない、粗大粒径の濃度低減やパッシブな長期的 Cs 抽出などである。また、微細粒径画分の更なる分離には、実務レベルで使用されながら鉱物観察の例が少ないサイクロンについても粘土鉱物の分離などによる検討を行った。以下に、検討の分類と各検討の概要を示す。



以上の検討から、粗大粒径より単一に回収された鉱物粒子群の分析により粘土鉱物に Cs が濃集することがバルクレベルで確認された。また粗大粒径画分中に残留する粘土などの微粒子については資源工学的な粉碎などの処理によりを剥離・除去できることが示された。微細粒径画分についても、サイクロンの運用により粘土鉱物を主体とした画分を回収できることが確認された。しかし、Cs は粘土鉱物を抽出してもそれより大きな粒径画分にも分配することもわかったことから、より選択的な分離技術の必要性が示唆された。

本年の検討では、技術リファレンスの構築に向けた検討も新たに開始された。既存の技術情報を収集・整理・分類し、それに本プロジェクトの基礎研究成果を含め情報発信する方法を検討した。検討の結果、種々の課題や留意点が上がったが、適正な

運営体制や提示情報の在り方を構築していくことで進められる方向性が見出された。  
この中で、次年度では試験的公開を行って実地に検討していく方法も検討された。

### 3. 土壌・粘土鉱物中の Cs 吸着サイトの特定・分布に関する検討

#### 3. 1 TOF-SIMS を用いた粘土鉱物への安定 Cs 吸着状態の可視化

##### 3. 1. 1 研究報告の概要

平成 23 年 3 月に福島第 1 原発から放出された半減期の長い放射性  $^{137}\text{Cs}$  は、4 年近くたった今でも、福島県を中心に大地に広範囲渡って広く分布している。今後の除染・減容活動を効率的に進めるためには、従来の土木的技術を用いた大がかりな除染・減容技術開発と並行して、放射性 Cs の物理的・化学的状态を知る必要がある。まずは、2011 年 9 月 22 日(木)から、2015 年 2 月 14 日(土)までの期間、NIMS つくば 3 地区(並木, 桜, 千現)における空間線量率の時間推移を記録しており、現在の我々の職場環境のみであるが、放射線汚染の状況を調査した。次に、平成 25 年度末に導入した IP 読み取り装置を用いた極微量放射性物質の放射能評価法の確立のため、引き続き小倉らの方法にならって、IP 上にレーザーマーカーによって凹凸情報が記録された 2 次元画像情報(位置, 放射線量)を読み取り、定量及び画像解析を行うための要素技術開発を引き続き行った。さらに、昨年度に引き続き、膨潤性の 2:1 型粘土鉱物の 1 つであるバーミキュライトを Cs 吸着のモデル物質として選び、TOF-SIMS (飛行時間 2 次イオン質量分析計, Time-of-flight secondary ion mass spectrometer) を使った安定 Cs の 3 次元可視化を試みた。

##### 3. 1. 2 実施報告の背景・目的

福島第 1 原発事故が原因で、広範囲に放射能で汚染された大量の土壌の除染及び減容化は喫緊の課題となっている。特に土壌を構成している粘土鉱物に Cs が吸着されやすいことが既に知られているが、粘土鉱物への Cs の吸脱着メカニズムはまだわかっていないことが多い。従って、このメカニズムの理解は、今後の土壌の除染・減容化において重要な指針を与えるであろう。

既に、前年度の報告書でも述べたように我々が実験で取扱いのできる範囲の放射性 Cs 等に汚染された土壌等の放射性 Cs の濃度は、Ge 半導体検出器を用いて飯舘村で採取された土壌 67.47g の  $\gamma$  線計測から(表 3.1.1 参照)、 $^{137}\text{Cs}$  の放射能からこの土壌中に含まれる  $^{137}\text{Cs}$  の量を見積もってみると、 $2.4 \times 10^{11}$  程度と見積もられる。

たとえば、この土が全て白雲母(muscovite)  $\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{H}_2\text{O})_2$  からできていると

Radionuclide	Energy [keV]	Activity [Bq/g]
$^{134}\text{Cs}$	605.66	1.48(2)
$^{137}\text{Cs}$	661.64	2.64(2)
$^{134}\text{Cs}$	795.76	1.51(2)
$^{134}\text{Cs}$	801.84	1.41(6)
$^{40}\text{K}$	1460.75	0.38(4)

表 3.1.1. 福島県飯舘村で採取された土(67.47g)の放射能

仮定すると、2 ppt 程度の濃度の極微量  $^{137}\text{Cs}$  が含まれている事になる。つまり、放射線計測以外の物理化学的分析手段測定出来る限界はせいぜい ppm 程度なので、Cs の吸着量を調べることは、相当困難と言わざるを得ない。このように、現時点では、放射性分析装置以外の既存の微量分析技術で、汚染土壤中での Cs の物理的・化学的形態をとらえる事に限界があることは否めない。しかしながら、実際には、土壤中における放射性物質は均一に分布している訳ではなく、ある特定の粘土鉱物に選択的に吸着されている事が指摘されている<sup>1,2)</sup>。

実際に汚染された土壤等に含まれる放射性元素からの極微量の放射線量を空間的に評価する方法の1つとして、放射線量蓄積型のイメージングプレート (IP) フィルムを利用したオートラジオグラフィ法が知られている。IP は電離放射線を二次元的に検出・記憶が可能な輝尽性蛍光体からなる媒体である。当該年度は、まず、平成 25 年度末に導入した IP 読み取り装置を用いた極微量放射性物質の放射能評価法の確立のため、引き続き IP 上に記録された 2 次元画像情報 (位置, 放射線量) を読み取り、定量及び画像解析を行うための要素技術開発を研究目標とした。

一方、さらに空間分解の高いプローブでの Cs の検出が望まれるが、通常の汚染土壤では、現有の顕微鏡技術では、放射性 Cs の場所の特定は出来ないと思われる。今後の土壤の除染・減容化に向けた様々な取り組みの中で、たとえ非常に濃い Cs 濃度の実験から得られた結果であっても、様々な条件下での粘土鉱物の各サイトの吸脱着の知見を知ることは、あながち無駄ではないと思われる。そこで、我々は、当該研究期間において、図 3.1.1 に示す膨潤性の 2:1 型粘土鉱物の 1 つであるバーミキュライトを Cs 吸着のモデル物質として選んだ。層間に交換性陽イオンと水分子を持ち、層電荷が 0.6 より大きいものをバーミキュライトと呼んでいる。

一方、SIMS (Secondary Mass Spectrometry) は、スパッタリングによって放出される粒子のうち二次イオンを引き出して質量分析法である。二次イオンを直接カウントすることで高感度の分析を可能としている。深さ方向の元素組成情

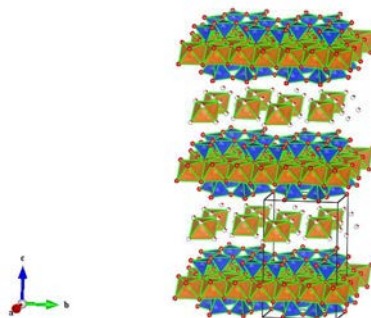


図 3.1.1. 粘土鉱物バーミキュライトの結晶構造

当該研究期間において、図 3.1.1 に示す膨潤性の



図 3.1.2. NIMS つくば 3 地区 (千現, 並木, 桜) における放射線計測マップ

報を得ることのできるダイナミック SIMS と最表面の部分構造や化学情報を得ることのできるスタティック SIMS に大別される。本研究で用いられた飛行時間型 2 次イオン質量分析法 (Time-of-flight Secondary Mass Spectrometry, TOF-SIMS) は、後者のスタティック SIMS に属し、固体試料の表面にどのような原子・分子が存在するかを調べることが可能な装置である。1 次イオンビーム (Bi (Au) 或いは, Ga イオン) を固体試料照射し、試料の最表面 (深さ数 Å 程度) から発生した 2 次イオンを飛行時間 (TOF) 型質量分析装置で高感度に質量分析することにより、同位元素分離及び、半定量評価が可能となる。また、スパッタイオン銃 (アルゴン/酸素) によって深さ方向に掘り進めることで、質量数分布の 3 次元可視化が可能となる。飛行時間型 2 次イオン質量分析法 (TOF-SIMS) は、ppm 程度の濃度の微量分析法の 1 つであるが、その空間分解能は 0.1 マイクロメートル程度、質量分解能は 12,000  $m/\Delta m$  と非常に優れている。残念ながら、TOF-SIMS を用いた粘土鉱物に吸着する Cs の局所分析の検討例はほとんどなかったが、上記の TOF-SIMS の持つ有用性を考えると TOF-SIMS を用いた除染研究は検討するに値すると思われる。

### 3. 1. 3 試験方法

#### 3. 1. 3. 1 NIMS つくば 3 地区の空間放射線量率の時間変化

物質・材料研究機構 (NIMS) つくば 3 地区 (図 3.1.2) における NaI シンチレーションサーベメータ (日立アロカメディカル製 TCS-172B) で計測した空間放射線率の時間推移を調査し、データは、NIMS の HP (<http://www.nims.go.jp/siteinfo/info/site-radiation/>) 上で公開した。

#### 3. 1. 3. 2 イメージングプレートによる放射性物質の可視化

IP フィルム上に散布された土壌粒子から放射性土壌粒子のみを効率よく抽出する方法が小暮等によって確立されており、同じような手順で試みた<sup>3)</sup>。

我々が用いた IP フィルム読み取り装置 (X 線サイエンス社製, TRY-IPX, 図 3.1.3 参照) は、以下の性能を有している。

- 1) IP サイズ : 120mm x 80mm。
- 2) 読み取りサイズ : 120mm x 76mm 。
- 3) 最小読取画素 : 30 $\mu$ m

また、試料の放射線による信号強度が極端に弱いことが予想されたので、IP フィルムと放射性微粒子の距離を短くするため、バーミキュライト微粒子をアセトン中に分散させたものを、IP フィルム上に噴霧し、直接試料の IP フィルム上への固定化を図った。また、試料の位置と放射線による感光部分の位置との関係を付けるため、位置決めとして IP フ

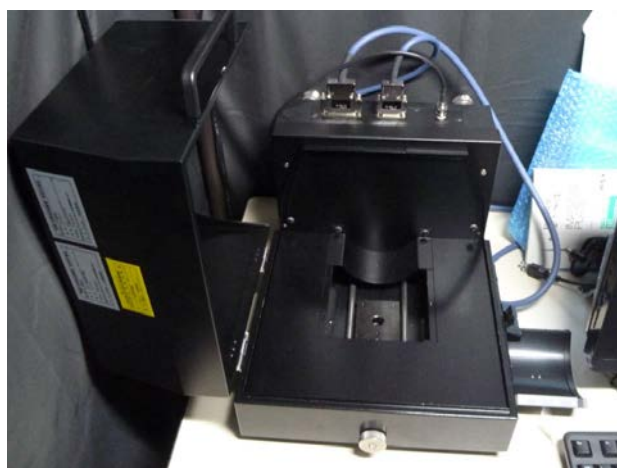


図 3.1.3 IP フィルム読み取り装置 (X 線サイエンス社製, TRY-IPX) 概観。

位置決めとして IP フ

フィルム (BAS ME 2025 E) 上に 250  $\mu\text{m}$  間隔でレーザー穴加工を施した。さらに、長時間露光に関しては、遮光のため IP フィルムを黒い遮光箱にしまい、さらに外部からの放射線の影響を避けるために、鉛ブロックを積み上げて、保存出来る空間を作り、その中に遮光箱を設置した。また、IP フィルム読み取り機に装着する際に、可視光で感光しないように簡易暗幕の中に装置全てを設置した。さらに、この放射の絶対値を調べるために、 $^{137}\text{Cs}$  標準線源を用いて IP フィルムの黒化度からの評価と、直接 Ge 半導体検出器による評価を行った。

飯舘村除染活動を通して 0.2~2 $\mu\text{m}$  の粒径の土壌サンプルで実際にどのくらいの放射線量があるのかを IP フィルムを用いたオートラジオグラフィで露光して調査した。

### 3. 1. 3. 3 TOF-SIMS による安定 Cs の可視化

TOF-SIMS 測定には、アルバック・ファイ社製の PHI TRIFT V nanoTOF を使用し、質量分析を行った。本装置は、以下の特徴を有している (図 3.1.4 参照)。

(1) 2 本の 1 次イオン照射系 (Ga 及び, Bi イオン銃) で広い質量範囲をカバーしている。

- ・低質量数(ゼオライト成分付近) : 11,000  $\text{m}/\Delta\text{m}$  以上 (@SiH<sup>+</sup>, Ga<sup>+</sup>)
- ・中質量 (セシウム付近) : 12,000  $\text{m}/\Delta\text{m}$  以上 (@150u 付近, Ga<sup>+</sup>)
- ・高質量数 ( $\text{m}/z \geq 200\text{u}$  の有機系ピーク) : 15,000  $\text{m}/\Delta\text{m}$ .以上 (@200u 以上, Bi<sup>+</sup>)

(2) スパッタイオン銃系 (アルゴン/酸素イオン銃) によって深さ方向の質量分析が可能。

(3) 数ミクロン~50 ミクロン程度の凹凸を持つ試料の全面で分析が行える飛行時間型質量二次イオン質量分析計を有している。

(4) 試料表面の正負の静電気を除去する機構 (ニュートライザー) を有している。

(5) 空間分解能は、以下の通りである。

パルス式ビスマス液体金属型イオン銃使用時

・空間分解能 90 nm 以下 (DC ビーム, 30kV, 10pA 以上)

・空間分解能 100 nm 以下 (Bi<sub>1</sub><sup>+</sup>, パルスモード, 30kV, 10pA 以上)

パルス式ガリウム液体金属型イオン銃使用時

・空間分解能 50 nm 以下 (DC ビーム, 30kV, 10pA 以上)

・空間分解能 80nm 以下 (Ga<sup>+</sup>, パルスモード, 30kV, 10pA 以上)



図 3.1.4. 高分解能飛行時間型 2 次イオン質量分析装置 (TOF-SIMS) の外観。

TOF-SIMS 用の試料としては、まず、1000 ppm~0.1ppm までの様々な安定同位体  $^{133}\text{Cs}$  濃度の塩化セシウム水溶液を用意し、その中に南アフリカ産バーミキュライトを浸し、

その後、遠心分離器により分離後、乾燥したものを Cs-バーミキュライト試料とした (NIMS 山田氏より提供)。上記の粉末試料は、銅板上に両面テープで貼り付けるか、あるいは、In シートに押しつけて観察を行った。実際には、板状の試料の観察を行った。

### 3. 1. 4 実施研究の結果

#### 3. 1. 4. 1 NIMS つくば 3 地区の空間放射線量率の時間変化

図 3.1.4 に物質・材料研究機構(NIMS)つくば 3 地区における空間放射線率の時間推移を示す。2011 年 9 月 22 日(木)から、2015 年 2 月 14 日(土)までの約 2 週間毎の 3 年 6 ヶ月間の地面から 0cm, 50cm, 100cm の位置での空間放射線率をプロットしたものである。横軸は、2011 年 3 月 14 日における福島第 1 原発から放射性 Cs がつくば地区に飛散した時間変化となっている。NIMS つくば 3 地区において空間線量率は、並木地区、千現地区、桜地区の順番で減少している。つくば市では、荖崎地区で空間線量が高かった(2011 年 6 月で約  $0.3\mu\text{Sv/h}$ )ことから、南に向かえば高い空間線量率を示す傾向と矛盾しない。最初の 6 ヶ月間のデータは欠落しているが、既に福島第 1 原発事故から約 4 年間が経過しており、平常時における一般公衆に対する放射線量の基準が年間  $1\text{mSv}$  以下と定められている。環境省の放射性物質汚染対処特措法に基づく汚染状況重点調査地域の指定や、除染実施計画を策定する地域の要件が、 $0.23\mu\text{Sv/h}$  以上の地域である

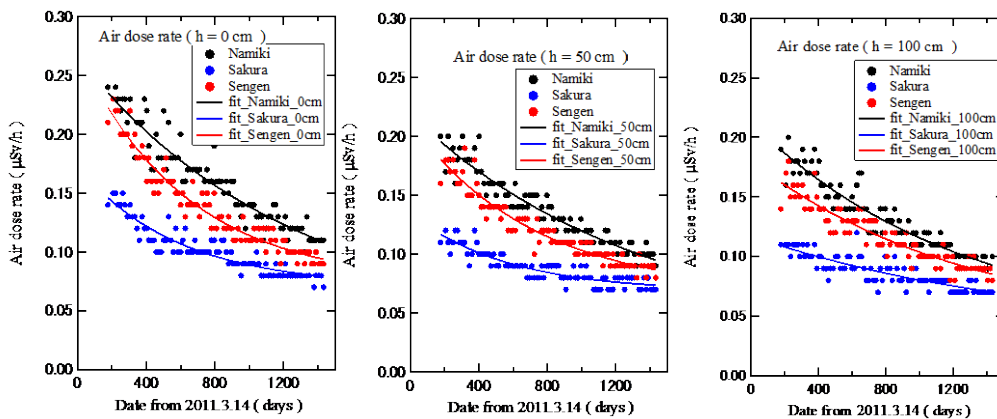


図 3.1.4 NIMS つくば 3 地区(並木, 桜, 千現)の空間線量率の時間推移

こととなっている (測定位置は地上 50cm~1m)。この値は、事故由来分  $0.19\mu\text{Sv/h}$  と自然放射線分  $0.04\mu\text{Sv/h}$  の和として見積もられている。指数関数的に減衰する成分と定数成分の和として計測データを解析すると 3 地区の中で相対的に空間線量率高い並木地区であっても、上記の単純なモデルを外挿してみても、事故当時であってもほぼ平常時の基準以下と見積もられる(表 3.1.1 参照の事)。但し、千現地区の別の計測ポイントで 2011 年 3

	$I_0$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	$\lambda$ (/days)	$T_{1/2}$ (days)
Namiki	0.21(5)	$8.2\text{e-}4$	845
Sakura	0.12(6)	$6.3\text{e-}4$	1104
Sengen	0.18(5)	$7.8\text{e-}4$	892

表 3.1.1 NIMS つくば 3 地区における地上から 100cm での空間放射線量率

月 16 日 から 毎日 数 回 公 開 し て い る デ ー タ  
([http://www.nims.go.jp/siteinfo/info/sengen\\_radiation-ray.html](http://www.nims.go.jp/siteinfo/info/sengen_radiation-ray.html))

によると 2011 年 3 月 22 日～23 日の、 $0.32\mu\text{Sv/h}$  に 達 し て い る 日 も あ っ た の で、上 記  
の 見 積 も り は 必 ず し も 正 確 で は な い。空 間 放 射 線 量 が  $1/2$  に 減 衰 す る 半 減 期  $T_{1/2}$  を 見  
る と い ず れ も 2 年～3 年 と な っ て い る。計 測 し た 場 所 が い ず れ も グ ラ ウ ン ド で あ る こ と  
か ら、土 壌 の 物 質 移 動 は 考 え に く く、半 減 期 2 年 を も っ て い る  $^{134}\text{Cs}$  の 減 衰 が 主 に 効  
い て い る も の と 思 わ れ る。同 時 に ス ペ  
ク ト ル 解 析 機 能 付 き の NaI シ ン チ レ ー  
シ ョ ン カ ン タ ー (BNC 社 製  
Model640) で 放 射 線 ス ペ ク ト ル も 計 測  
し て い る た め、詳 し い 原 因 に 関 し て は、  
今 後 の 解 析 結 果 を 待 ち た い。放 射 線 つ  
く ば 市 で は、幸 い 大 き な 放 射 能 汚 染 は  
な か っ た も の の 福 島 県 で は 今 で も 除 染  
の 対 称 地 区 や、帰 宅 混 雑 地 区 な ど が 残  
っ て お り、福 島 再 生 の た め に は Cs 除  
染・減 容 化 の た め 研 究 開 発 は 重 要 と 考  
え る。

### 3. 1. 4. 2 イメージングプレートによる放射性物質の可視化

IP フィルム(富士フィルム社製  
BAS-MS)に様々な条件でレーザー加工  
を施した後、IP 読み取り装置で検出した  
画像イメージを図 3.1.5(a)に示す。図  
3.1.5(b)と(c)に光学顕微鏡写真を示  
す。図 3.1.5(c)に示すように、直径  
 $50\mu\text{m}$  の 丸 の 部 分 が 焼 け 焦 げ て 見 え る が、IP  
光 画 像 で は っ き り コ ン ト ラ ス ト が 取 れ た た  
の で 条 件 (8-G) で 加 工 す る 事 に し た。

図 3.1.6 に IP フィルム上に分散された土  
壌の顕微鏡写真と 166 時間露光後の現像写  
真の合成写真を示す。右下の○で囲んだ部  
分に放射性 Cs の存在が認められた。位置の  
決定精度にまだ問題があるため、まだどの  
土壌粒子が放射性 Cs を吸着しているのか  
特定できなかったが、 $0.2\mu\text{m}$ ～ $2\mu\text{m}$  程 度 の 粒 子  
か ら の 放 射 線 を 捉 え た 事 を 意 味 す る。

### 3. 1. 4. 3 TOF-SIMS による安定 Cs の

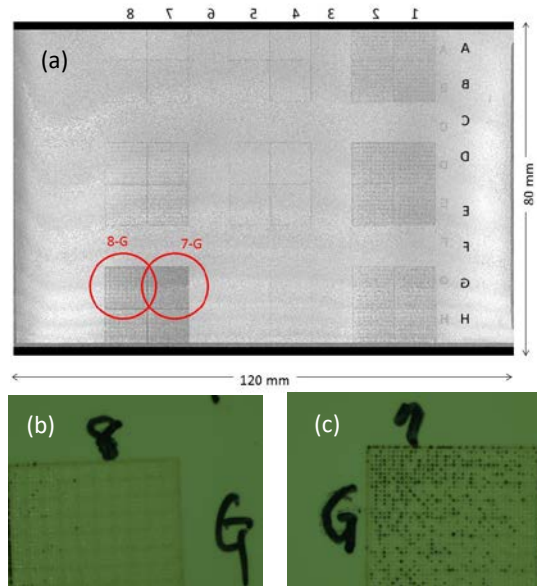


図 3.1.5 (a) IP フィルム(富士フィルム社  
製 BAS-MS)に様々な条件でレーザー加  
工を施した後、IP 読み取り装置で検出  
した画像イメージ。(b)、(c)8-G 及び、7-G  
の光学顕微鏡写真。

発  
い

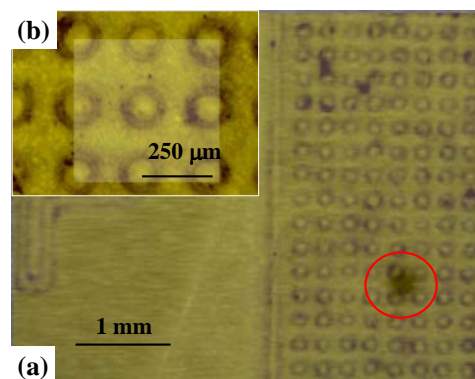


図 3.1.6 (a)IP フィルム上に分散  
された土壌の顕微鏡写真と 166 時  
間露光後の現像写真の合成写真。  
(b) ○で囲まれた部分の顕微鏡拡  
大写真。

可視化

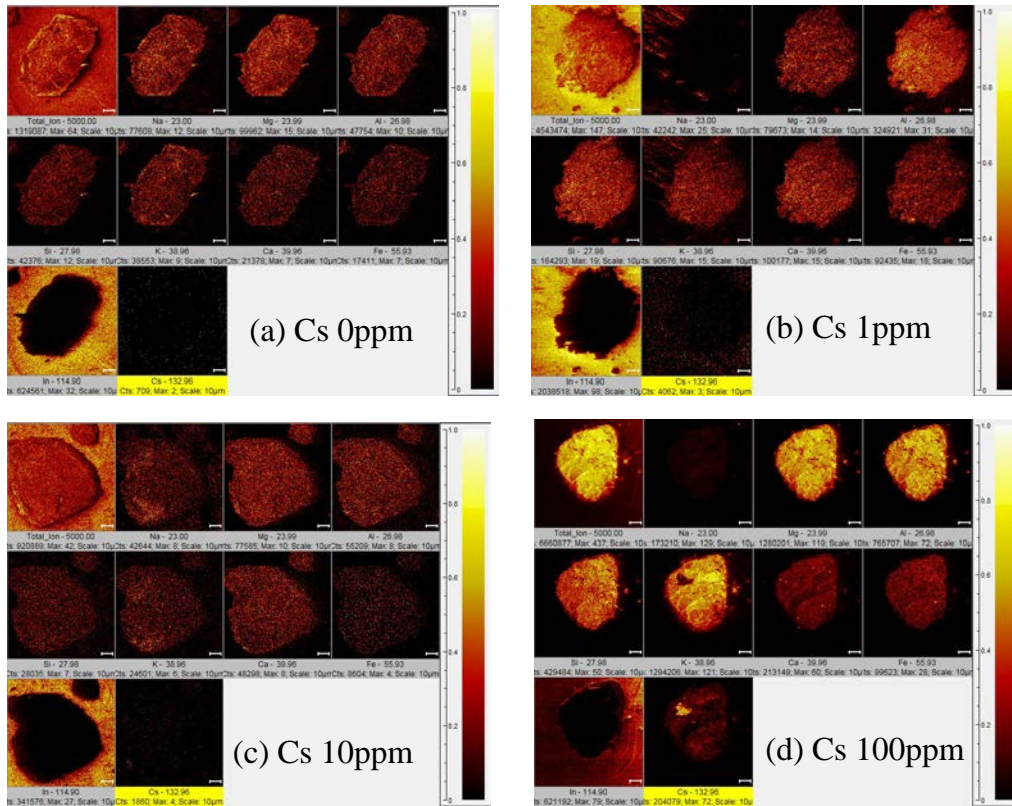


図 3.1.7. 粘土鉱物バーミキュライト (Cs 濃度 0ppm ~100ppm) に対する 2 次元元素マッピング。

これまで、Bi+イオンバンチングモード（高質量分解モード）で、Cs 吸着粘土鉱物バーミキュライト ( $^{133}\text{Cs}0.1\text{ppm}$ ) までならば、ぎりぎり検出が可能であった。しかしながら、2次元イメージングには、バンチングモードでは、空間分解能が悪いため、今回はアンバンチングモードでの観察とした。

図 3.1.7 に Cs 濃度 0ppm~100ppm の試料の 2次元元素マッピングを示す。図 3.1.7(d) の Cs 濃度 100ppm の場合は、明らかに  $^{133}\text{Cs}$  が濃縮している箇所が観察された。その場所には逆に  $^{40}\text{K}$  の濃度が減っていることがわかる。このことから、Cs イオンが K の代わりにイオン交換された証拠であると考えられる。Cs 濃度 10ppm まで減ると 2次元元素マッピングでは、わずかに分布があるように見えるものの非常に弱い。Ar スパッタによって Cs の 3次元マップを取って

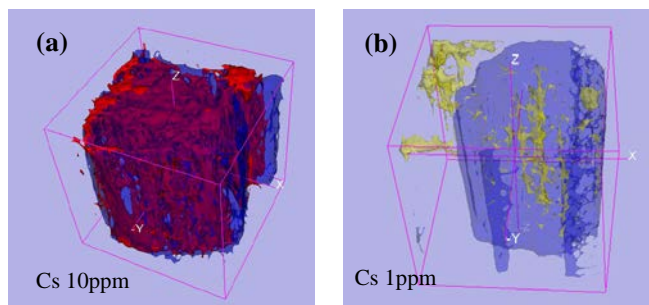


図 3.1.8. 粘土鉱物バーミキュライト (Cs 濃度 100ppm) に対する深さ方向分布。

みる(図 3.1.8(a)参照)と明らかに試料の中まで分布していることがわかる。Cs 濃度 1ppm 以下ではもはや分布をとらえる事が難しい事がわかる。

図 3.1.9 に深さ方向の元素分布を示す。これは、Ar イオンで粒子の全面をスパッタしながら出てくる 2 次イオンを検出している。現時点では、スパッタ時間と試料の深さの関係は、評価してはいないため、定量的な議論は出来ないが、 $^{133}\text{Cs}$  と  $^{23}\text{Na}$  に何らかの相関が見て取れるくらいであり、はっきりした傾向を得ることができていない。前回、Cs 濃度 100ppm の深さ方向の元素分布測定では、Cs イオンは、K イオンを伴いながら、Na イオンや Ca イオンを排除して層間に侵入しているように見えたが、Cs 濃度が薄くなるとそう単純ではないのかもしれない。より深い考察は、もう少しデータをためてから議論したい。

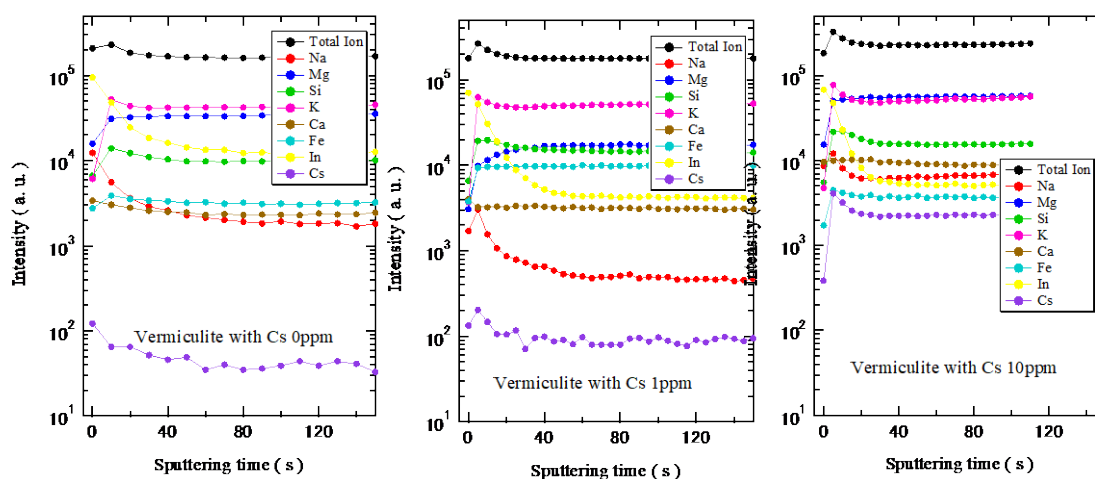


図 3.1.9. 粘土鉱物バーミキュライト (Cs 濃度 0ppm~10ppm) に対する深さ方向の元素分布。

### 3. 1. 5 実施研究のまとめ

Cs を選択的に吸着すると考えられている粘土鉱物バーミキュライトに安定 Cs を吸着させた Cs-バーミキュライト系の試料に関して、TOF-SIMS では 10ppm までの Cs の 3 次元分布が観測できるようになった。Cs 濃度が 100ppm 以上吸着された環境だと、イオン交換の様子が調べられるのであるが、それより薄い濃度の場合は、それほど単純ではなく、より緻密な実験が必要であることがわかった。

### 3. 1. 6 今後の課題

今後の課題としては、以下の内容を早急に検討するつもりである。

- (1) TOF-SIMS における Cs の定量性評価を他のナノ評価法と組み合わせる事によって確立する。
- (2) ガススパッタによって、Cs 吸着バーミキュライトを用いて、吸着状態ばかりでなく、吸着・脱離過程中的 Cs 三次元可視化を試みる。

(3) IP オートラジオグラフィと XRD, SEM-EDS, TOF-SIMS 等を組み合わせることで、実際にどの粘土鉱物にごく微量の放射性 Cs が吸着しやすいかの研究を進展させる。

### 3. 1. 7 参考文献

- 1) B. Delvaux, N. Kruyts, E. Maes, and E. Smolders,(2001) Trace Elements in the Rhizosphere, ed. By GR. Gobran, W. W. Wenzel, and E. Lombi (CRC Press, Florida, 2001) p.61.
- 2) N. Kozai, T. Ohnuki, M. Arisaka, M. Watanabe, F. Sakamoto, S. Yamasaki, and M. Jiang, (2012) Chemical states of fallout radioactive Cs in the soils deposited at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, J. Nucl. Sci. Technol. 49, 473-478.
- 3) H. Mukai, T. Hatta, H. Kitazawa, H. Yamada, T. Yaita, and T. Kogure, (2014) Speciation of Radioactive Soil Particles in the Fukushima Contaminated Area by IP Autoradiography and Microanalyses, Environmental Science & Technology, 48, 13053-13059.

### 3. 2 分析電子顕微鏡を用いた Cs 安定吸着サイトの探索

#### 3. 2. 1 研究報告の概要

従来から、Cs の粘土鉱物への吸着機構として、Si 四面体サイト層の間（膨潤層）に取り込まれる比較的弱い吸着と、これと異なる強い吸着の 2 種類あることが、各種の実験で示唆されている。これまで、強い吸着を示すサイト（安定吸着サイト）の候補として、層構造がほつれてできた欠陥サイト（フレイドエッジ：frayed-edge）が想定されてきているが、顕微学的に構造と Cs 吸着の相関が確かめられた例はなく、本課題では、分析電子顕微鏡を用いて、層構造と Cs 吸着分布との比較を行ってきた。安定吸着サイトを洗い出すため、今回、 $K^+$ や $NH_4^+$ を共存させ Cs が吸着しにくい環境下を作り、その違いを比較した。その結果、いずれの条件でも、Cs は Ti が多く、K、Fe が少ないバンド（原子層の集まり）に偏析することが確認された。Ti 濃度が、Cs と K の吸着選択性に影響を与えているだけではなく、元来、Ti 濃度によって Cs 吸着特性に違いが現れることが示された。

#### 3. 2. 2 実施報告の背景・目的

Cs は粘土鉱物の膨潤層によく吸着するが<sup>1)</sup>、イオン交換によって Cs を洗い出そうとしても、Cs 全量を洗い出すことが難しく、いくばくかの Cs が残存することが知られており、膨潤層以外に不可逆な安定吸着サイトが存在することが指摘されている<sup>2)</sup>。また、Cs と同じアルカリ金属である K について、吸着サイトは一つではなく 3 通りあり、サイトによってイオン置換の速度に大きな差があることが報告されている<sup>3)</sup>。こうした安定吸着サイトの候補として、フレイドエッジがあげられることが多い<sup>4)</sup>。

本研究では、安定吸着サイトを明らかにするため、分析電子顕微鏡を用いて、粘土鉱物の層構造と Cs の吸着分布の関係について、粘土鉱物の種類や Cs の浸透条件を変えながら観察してきた。その結果、これまでに次のことを報告してきた。1) Cs のみを浸透させた場合、バーミキュライトよりスメクタイトの方がより多くの Cs を吸着する。2) Cs のみを浸透させた場合、バーミキュライト全体にほぼ均一に Cs が吸着される。Cs の分布と K の分布に負の相関が見られることから、Cs は K と同様、膨潤層に吸着されていることが裏付けられた。3) Cs 浸透の際、 $K^+$ や $NH_4^+$ を共存させた場合、バーミキュライトでもスメクタイトでも、Cs の吸着量が抑えられ、バーミキュライトとスメクタイトで Cs 吸着量に差異が見られなくなる。4)  $K^+$ が共存する環境下で Cs を浸透させた場合、バーミキュライト全面に Cs が吸着せず、特定のバンド（厚さ 50nm 程度の原子層の集まり）に偏析する。このときの Cs 吸着分布は、Ti 分布と正の相関を持ち、Fe、K の分布と負の相関を持つ傾向が見られ、八面体シートに含まれる Ti と Fe のわずかな含有量の違いで、Cs、K の吸着選択性が入れ替わることが示唆された。5) これまでに、フレイドエッジに相当する層構造がほつれた構造と Cs 吸着分布に相関は見られていない。

$K^+$ は膨潤層に吸着されるが、元来、粘土鉱物が最初から含有している成分でもある。今回、 $NH_4^+$ が共存した環境下での Cs 吸着分布を比較し、 $K^+$ が共存した場合との差異を検討した。

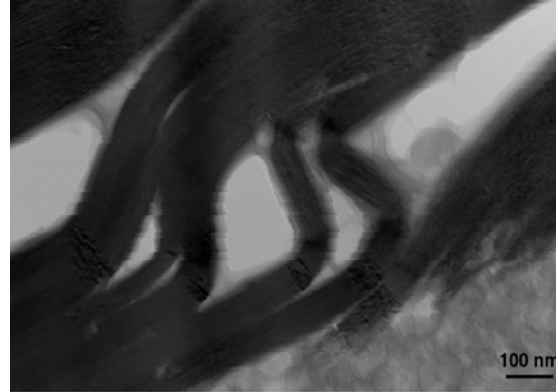
	Cs 濃度	溶媒	浸透時間	固液比
条件 1	4000ppm	水	10 日間	1:10
条件 2	1000ppm	1MKCl 溶液	10 日間	1:10
条件 3	1000ppm	1MNH <sub>4</sub> Cl 溶液	10 日間	1:10

表 3. 2. 1 実験に用いた Cs 浸透条件

### 3. 2. 3 実験方法

今回の分析に用いた粘土鉱物は、南アフリカ産バーミキュライトを用いている。Cs の浸透には CsCl を用い、溶媒として KCl 溶液と NH<sub>4</sub>Cl 溶液を用い、その差異を検討した。浸透条件は、表 3. 2. 1 のようにした。

Cs 浸透処理後、乾燥させた粉末から特定の粒子を拾い出し、集束イオンビーム法 (FIB) により約 10 μm 角の薄片をピックアップし、さらに FIB によって厚さ 100nm 程度まで薄片化し、透過電子顕微鏡 (TEM) 用試料とした。TEM 観察には、加速電圧 300kV の電子顕微鏡 (日本電子製 JEM-3100FEF) を用い、エネルギー分散型 X 線分光器 (EDS, Thermo Fisher Noran 製 System6) により、元素マッピングを実施した。



### 3. 2. 4 実施研究の結果と考察

最初に、条件 2 (Cs と同時に K<sup>+</sup>イオンが共存した場合) の観察結果を再掲する。図 3. 2. 1 に、走査透過電子顕微鏡像 (STEM 像) を示した。層構造が見られ、層がほつれた構造も見られている。

図 3. 2. 2 に、EDS による元素分布像を示した。微量元素 Ti, Fe, K は、ほぼ全面に存在している。一方、浸透させた Cs は、厚さ 50nm 程度のある特定のバンド (原子層の集まり) に選択的に浸透していることが特徴的である。これは、単一のバーミキュライトの中で、領域によって K と Cs の吸着選択性が大

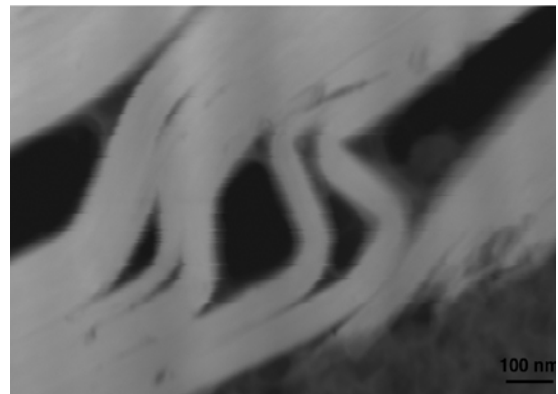


図 3. 2. 1 条件 2 で処理した試料の STEM 明視野像(a)と、暗視野像(b)

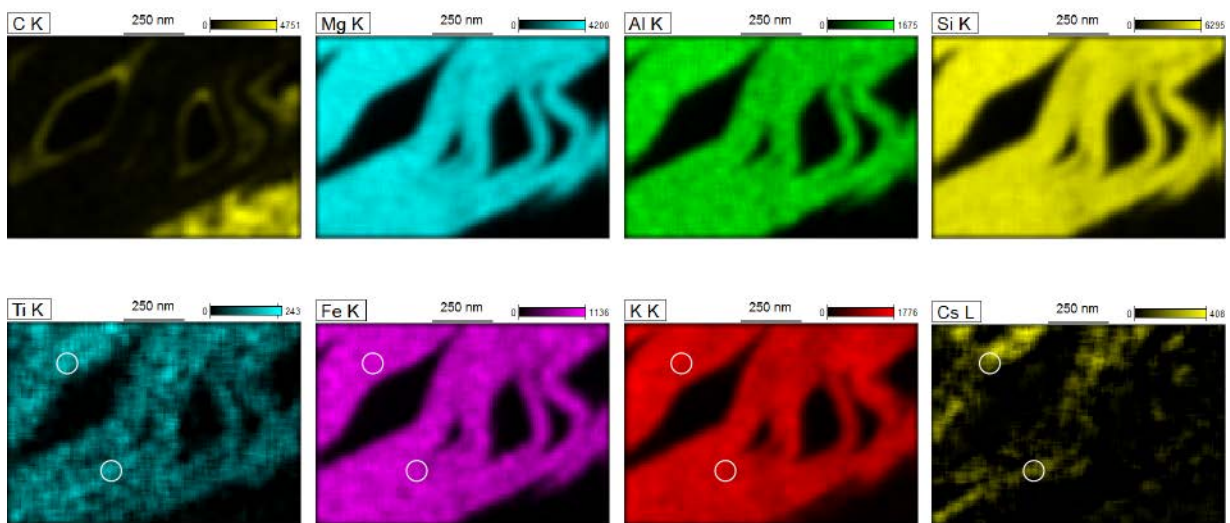


図 3. 2. 2 条件 2 で処理した試料の組成分布像

大きく異なることを意味している。

Cs を多く吸着している領域と微量元素との相関に着目してみる。図 3.2.2 で、Cs 吸着量が多い場所に白丸を示した。さほど顕著ではないが、この場所で Ti が多く、Fe, K が少ない様子が伺える。Cs と Ti に正の相関、Fe, K に負の相関が見られていることになる。

Fe は、 $\text{Fe}^{3+}$ イオンの場合四面体シートに、 $\text{Fe}^{2+}$ イオンの場合八面体シートに入ると考えられる。一方 Ti は、 $\text{Ti}^{4+}$ イオンとなって配位数 6 を持ち、八面体シートに入ると考えられる。このため、八面体シートに入っている  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ti}^{4+}$  の存在比率のわずかな違いで、K と Cs の吸着選択性が入れ替わることを示している。

次に、条件 3 ( $\text{Cs}$  と同時に  $\text{NH}_4^+$ イオンが共存した場合) の観察結果を示す。図 3.2.3 に、STEM 像を示した。図 3.2.1 同様、層構造が観察されている。

図 3.2.4 に、元素分布像を示す。 $\text{Cs}$  の分布を見ると、画像下半分の部分が、それ以外と比べて極端に濃度が高いことがわかる。同様に、Ti, Fe, K の分布状況を見ると、 $\text{Cs}$  濃度の高いところでは、Ti 濃度が高く、Fe, K 濃度が低いことがわかる。これらは、 $\text{K}^+$ イオンを共存させた場合と同じ傾向である。図 3.2.4 で見られている K は、粘土鉱物に最初から含まれている成分であることから、同じ粘土の中でも、微量元素組成のわずかな違いによって  $\text{Cs}$  の吸着特性が異なっていることが示された。

この観察でも、いわゆるフレイドエッジと呼ばれる層構造がほつれた部分に、 $\text{Cs}$  が選択的に吸着され

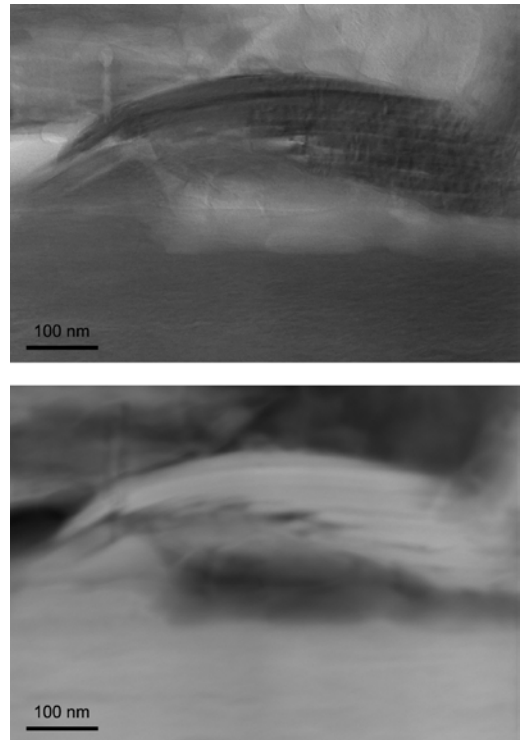


図 3.2.3 条件 3 で処理した試料の STEM 明視野像(a)と、暗視野像(b)

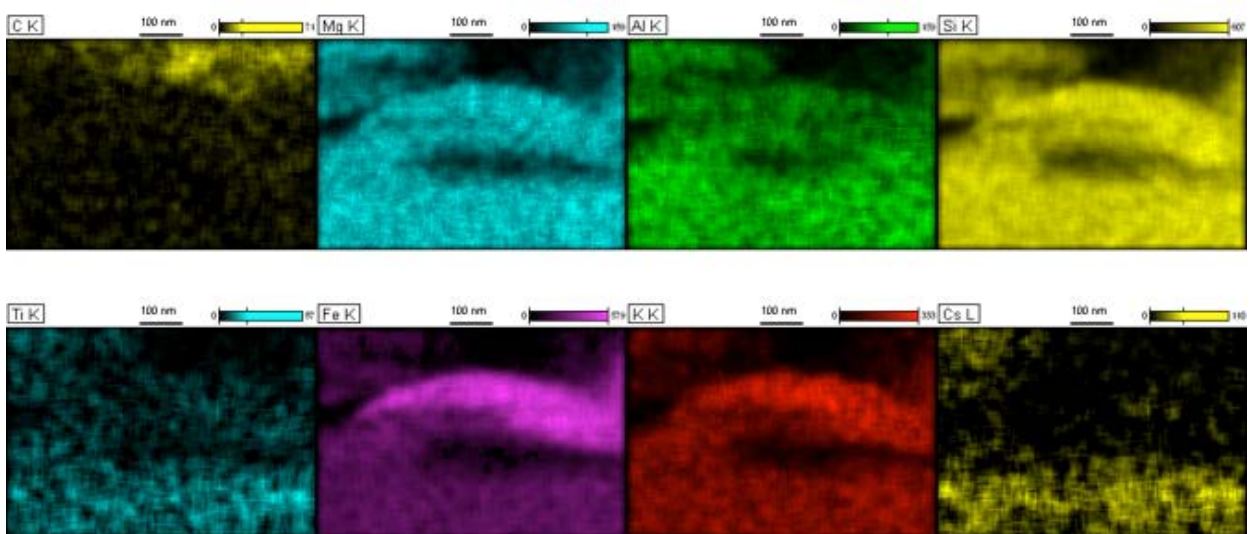


図 3.2.3 条件 3 で処理した試料の組成分布像

ている様子は見るができなかった。

### 3. 2. 5 実施研究のまとめ

今回、溶媒に $K^+$ イオンを含まない環境下でも、Ti と Cs の分布に相関が見られた。これにより、バーミキュライトの膨潤層において、わずかなTi 濃度の違いが、Cs, K の吸着選択性が入れ替わるのみならず、元来、Ti, K, Fe の濃度によってCs 吸着特性に違いが生じていることが明らかとなった。

この原因として、層間電荷の違いに伴う分極率の相違が、膨潤層に取り込まれるイオンの吸脱着特性に影響をおよぼしていること、もしくは、 $Fe^{2+}$ ,  $Ti^{4+}$ のイオン半径の違いによる構造緩和で、層間イオンの安定性が変化することなどが予想される。

### 3. 2. 6 今後の課題

今後、実際の福島産土壌において、微量元素がどのように分布しているのか、調べる必要があるだろう。

これまでの実験は、福島における実際のCs 濃度に比べ、桁違いに高い濃度で吸着させた場合の結果である。より低濃度になったとき、フレイドエッジのような特定の安定吸着サイトがあらわになるのかどうか興味深いところであるが、より高感度の検出器の導入が必要となる。

### 3. 2. 7 参考文献

- 1) B. L. Sawhney, (1966) Unusual sorption of cesium by vermiculite, *Nature* **211**, 893-894.
- 2) R. M. Cornell, (1993) Adsorption of cesium on minerals: A review, *J. Radio. Nucl. Chem.* **171**, 483-500.
- 3) B. Sawhney, (1972) Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: A review, *Clays Clay Miner.* **20**, 93-100.
- 4) A. Cremers, A. Elsen, P. D. Preter, A. Maes, (1988) Quantitative analysis of radiocaesium retention in soils, *Nature* **335**, 247-249.

### 3.3 X線技術によるCs-バーミキュライトの検討

#### 3.3.1 研究報告の概要

本研究課題では、セシウム吸着バーミキュライトについて得られたX線データをもとに、セシウム吸着メカニズムと構造の関連を検討するうえでの留意事項の整理を行った。また、粘土学会標準試料「クニピア」(天然モンモリロナイト、クニミネ工業)および、層状ケイ酸ナトリウム(アイライト)のセシウム吸着実験を行った。

#### 3.3.2 実施報告の背景・目的

福島第一原発の事故以来、環境中の放射性セシウムを効率的に捕集する機能を持つ材料への関心が、わが国ではこれまでになく高まっている。そのなかでも、バーミキュライト等、天然で得られる粘土鉱物は、その高いセシウム吸着能ゆえに、基礎、応用の両面から注目を集めている。当グループが本プロジェクトの初期に実施して取得したデータを含め、わが国でこの間行われている検討のほとんどは、研究対象となる粘土鉱物の産地や細かな特徴の差異を別とすれば、かなり以前に海外で先行して行われた研究<sup>1-3)</sup>と比べ、大勢において大きく違わないという印象を持つ。当時には採用することができなかつたであろうと思われる最新の計測・解析技術を適用する試みは、大変関心の持たれるところであり、意義深いと考える。これまでには十分なされていない検討や、より定量的な検討を踏み込んで行うことは、新材料の探索や設計も含めた高性能な捕集技術に関して有効な解を得るためにも、ぜひとも追求する必要がある。ところが、いざ最新の計測・解析技術の1つであるX線・放射光による解析を行う場合、必ずしも直線的に進めるわけではなく、留意点も少なからずあるように思われる。

今年度は、そのような留意点の整理を行い、セシウム吸着バーミキュライトのX線データの取り扱いの指針を確認した。また、粘土学会標準試料「クニピア」(天然モンモリロナイト、クニミネ工業)および層状ケイ酸ナトリウム(アイライト)のセシウム吸着実験を行った。

#### 3.3.3 試験方法

共通検討試料として配布されている2種のバーミキュライト(南ア産、福島産)、粘土学会標準試料「クニピア」(天然モンモリロナイト、クニミネ工業)および層状ケイ酸ナトリウム(アイライト)について、図3.3.1に示す方法でセシウム吸着を行った。層状ケイ酸ナトリウム(アイライト  $\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ,  $x=8$ ,  $y=10$ )は、東京都市大学において水熱法により人工的に合成された(図3.3.2にSEM写真を示す)。セシウム吸着量は、吸着終了後の溶液の化学分析の結果から推定している。溶液中に残らなかったセシウムはすべて吸着されたものと見なしているため、吸着量を多い目に見積もる傾向にあるが、厳密な絶対値の吸着量よりも、むしろ相互の比較に関心をもって検討した。蛍光X線分析およびXAFSは、高エネルギー加速器研究機構放射光科学研究施設のそれぞれBL-4A, BL-9Cにおいて行った。X線回折は、CuK $\alpha$ 線で通常の $\theta/2\theta$ 法により測定した。

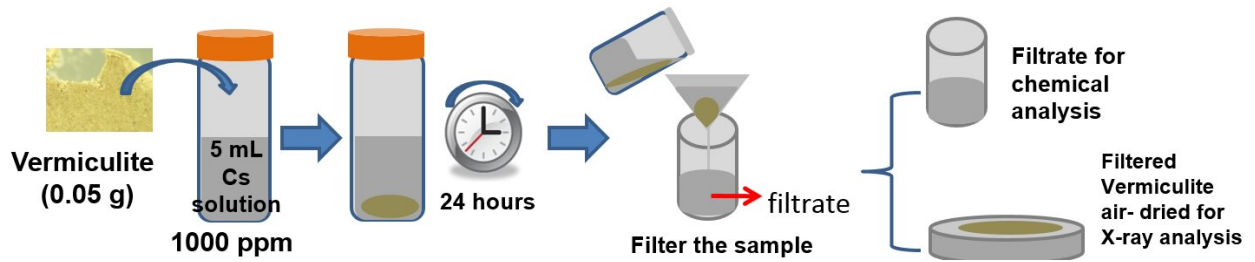


図 3.3.1 セシウム吸着試料の準備方法

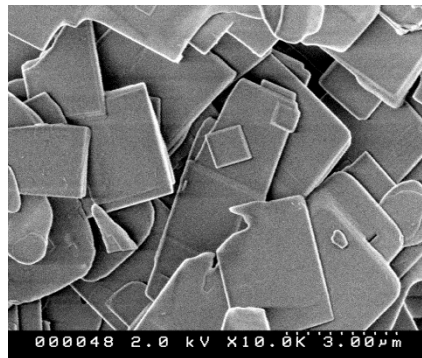


図 3.3.2 水熱法で得られた層状ケイ酸ナトリウム(東京都市大学)

### 3.3.4 実施研究の結果

#### 3.3.4.1 セシウム吸着バーミキュライト検討の留意点

##### 3.3.4.1.1 化学組成の不均一さ (蛍光 X 線マッピング)

物質の量や濃度の表現は、その前提条件を明らかにしたうえで語るべきものであるが、そうでない取り扱いをされることは多く、放射性セシウムによる土壌や水の汚染状況の報道を聞くと、セシウムがあらゆる場所に多量に存在しているような錯覚にさえ陥る。濃度は全体に占める重量（もしくはモル量）の比率であるから、その分母にあたるものが何であるか、それがどれくらいの量であるかが明らかでなければならない。また、均一性についての検討も重要である。

図 3.3.3 は、セシウム吸着させた南ア産バーミキュライト<sup>4)</sup>の薄い薄片状試料の破片の1つの表面を横断するように、放射光マイクロビーム（約5マイクロン）を1次元スキャンして得られた蛍光 X 線のラインプロファイルである（5.8 keV 励起、ただし鉄の分布と吸収係数の分布は 10keV で測定）。試料母相に含有される鉄やカリウムが平坦な場所的依存性を持たないのに対し、吸着されたセシウムについては蛍光 X 線強度で最大 2.5 倍程度の差異が認められた。通常の化学組成の分析では、試料を均一なものとして仮定したうえで、細かい数値を平均値として出して、詳細な議論をすることが多いが、このように分布を調べてみると、その前提が成り立っていないことがわかる。セシウム吸着南ア産バーミキュライトにおけるセシウム吸着量の不均一さは、広い濃度域で認められた。バーミキュライトのマトリックスに対して 1%に近い高濃度にもなれば、放射光を用いるまでもなく、EPMAなどでも容易に確かめられる。この不均

一さは、今回のような人為的な吸着実験の場合には、南ア産バーミキュライトの吸着能の不均一さを意味しており、形状的な因子（外周）やマクロな構造欠陥等が関係すると考えられる。

上述の文脈に関連する興味深い放射光マイクロビーム蛍光 X 線分析のデータが東京理科大の中井らによって報告されている<sup>5)</sup>。福島第一原発の水素爆発直後の 2011 年 3 月 14 日～15 日に茨城県つくば市で採取した直径 2 ミクロンの放射性エアロゾル粒子試料の蛍光 X 線分析を行い、鉄、亜鉛、ロジウム、ジルコニウム、モリブデン、錫、アンチモン、テルル、セシウム元素マッピングの結果が示された（図 3.3.4）。論文で示された 3 粒子のうち 2 粒子からはバリウムやウランさえも検出されている。この粒子が原発由来であることを断定するためには、放射能の分析をさらに詳細に行うことも必要であるが、この粒子自体がそうであってもなくても、今回生じている放射性セシウムの汚染の初期は、そのような粒子の飛来であったと想像され、そこには多くの示唆を含んでいるように思われる。それは、直径 2 ミクロンの粒子でみれば高濃度であり、放射能分析もできれば、マイクロビーム分析の対象にもなるが、そのような粒子の数が決して多くはないため、ある程度の体積を前提にすると、その濃度は非常に低濃度になってしまう。また、そのような粒子が地表に落ち、風向きや地形によって集積が進み、いわゆるホットスポットが生じたとしても、マクロなレベルでの不均一さという観点での理解が必要である。

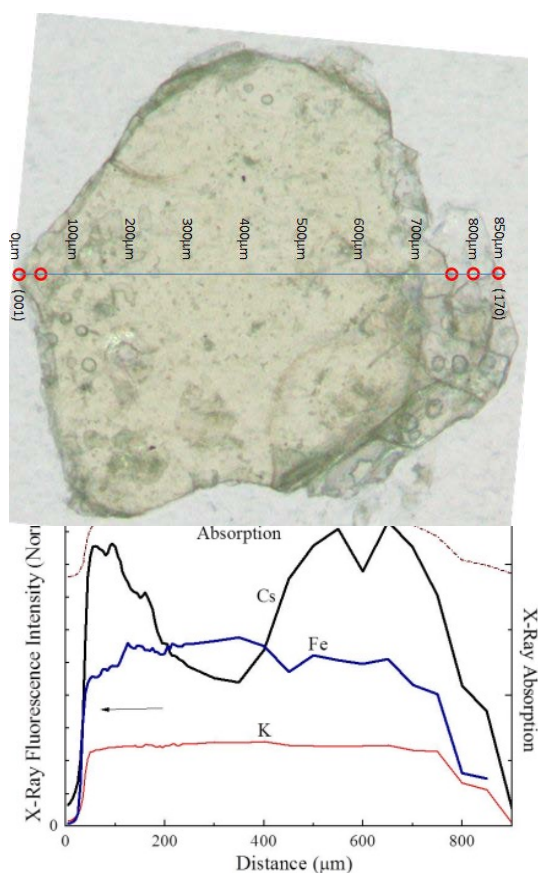


図 3.3.3 セシウム吸着南ア産バーミキュライトの 1 破片の放射光蛍光 X 線ラインプロファイル分析

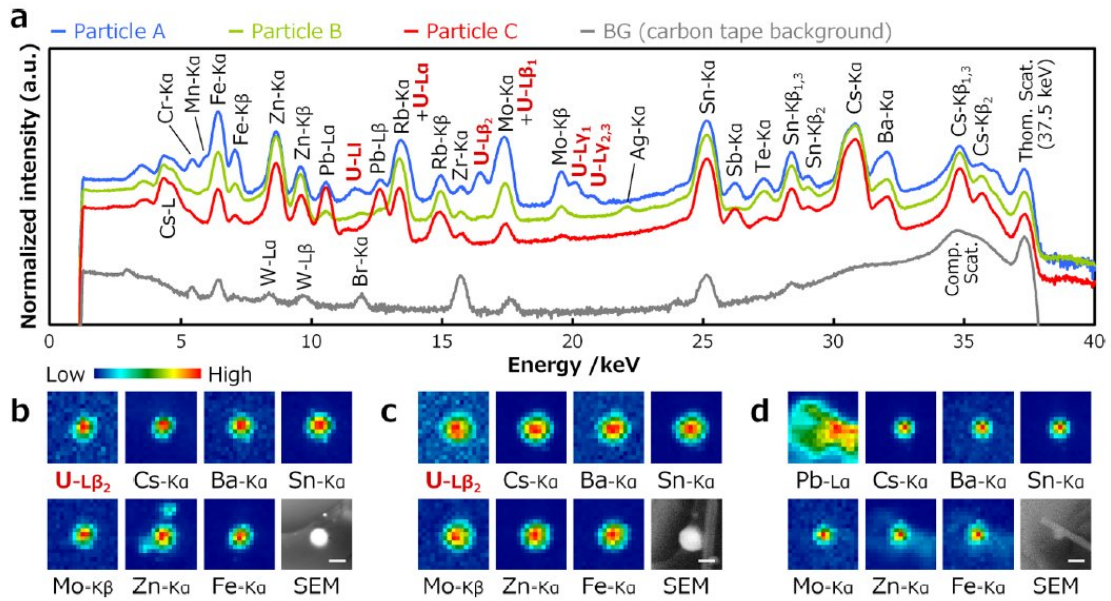


図 3.3.4 東京理科大の中井グループが報告した放射性エアロゾル粒子（2011年3月14日～15日つくば市に飛来）の放射光蛍光 X 線分析のデータ（詳細は、文献 5）参照）

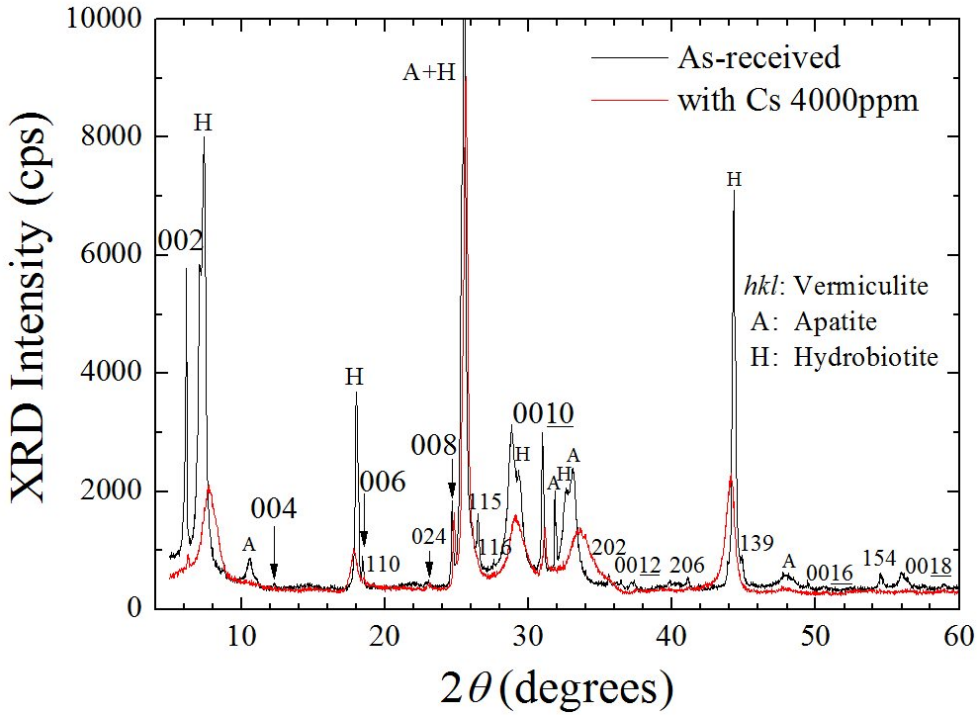


図 3.3.5 セシウム吸着南ア産バーミキュライトの X 線回折パターン

### 3.3.4.1.2 複数の結晶の混合および粒径効果 (X線回折)

X線回折法は、結晶構造と回折図形の関係を用いて、物質を理解するための標準的な手法であるが、その原理の単純さと適用範囲の広さの反面、きちんとした定量的な取り扱いのためには細かな条件があり、実際の試料がそれらを満足しないことは多くある。これまでに報告されている多くの研究でも、10度以下の低角域に認められる002反射ピークおよびその高次線の位置に注目した議論、すなわち、結晶構造の解析という観点より、層間距離に着眼した特徴づけ、指紋法的な分類が行なわれている。

図3.3.5は、セシウム吸着南ア産バーミキュライトのX線回折データである。いわゆるバーミキュライトだけでなく、ハイドロバイオタイト、アパタイトなど異なる結晶相由来と思われる回折線も確認される。X線回折データはセシウム吸着により大きく変化し、ピークシフトやブロードニングが見られた。特にバーミキュライトの002回折線強度は著しく弱くなった。層状ケイ酸塩の002回折線は層間に水を含む構造では強く、逆に水を含まない雲母などでは格段に弱いこともからも、水分子の脱離による変化と関連づけて理解しやすい変化である。002, 004, 006, 008, 0010回折の吸着前後のピーク位置変化に着目してc軸長の変化を計算すると、28.9Åから28.6Åと若干縮んでいる。イオン半径の小さいMg<sup>2+</sup> (0.72Å)は2枚のフィロシケート層の層間において水分子により水和された状態で挟まれているが、これとイオン半径の大きいセシウム<sup>+</sup> (1.67Å)が交換するときには水分子の脱離を伴うため、結果的に層間距離はほとんど変化しないと解釈される。

以上の検討は、多くの前提のあるモデル実験で得られる試料について、その前提に基づいて解釈することが可能な、きわめて恵まれたケースに過ぎない。バーミキュライトに含まれる2層の層間水に着目し、脱水和による層間距離の縮小に対応して回折ピークがシフトし、あるいは強度が変化するところを見ているが、セシウム吸着の結果でなくても、加熱やそのほかの理由によっても生じるものである。1対1の対応関係にはなく、そもそも低角側のたった1本か2本の回折線だけで、多くのことを語ろうとするには無理がある。モデル実験の類に入るような今回の検討でさえ、試料は単相ではない。また、以前の検討では、受領したフレーク状の試料と粉砕してふるい分けされた試料では、X線回折パターンの細部が異なっている。通常X線回折では、分析深さが表面の高々数10ミクロン程度の厚さにとどまることや、不均一効果、特にマクロな濃集が起きれば、回折強度に大きな影響があることにも注意を払う必要がある。

### 3.3.4.1.3 異なる原子種の混合 (EXAFS)

EXAFSは、着目する元素の吸収端の高エネルギー側のX線吸収スペクトルに観測される変調構造である。平面波の1回散乱の近似のもとで、次のような式で表現される。

$$\chi(k) = \frac{\Delta\mu}{\mu_0} = -\sum_j \frac{N_j}{kr_j^2} |f_j(k, \pi)| \times \sin[2kr_j + \psi_j(k)] e^{-2\sigma_j^2 k^2} e^{-2r_j/\lambda_j(k)}$$

実験的に実測される左辺の $\chi(k)$ から、各シェルごとの原子間距離 $r_j$ 、配位数 $N_j$ 、ゆらぎ $\sigma_j$ といった構造情報を決定する。その際、構造に依存しないとみなすパラメ

ータである後方散乱因子  $F_j(k, \pi)$ 、位相シフト  $\Psi_j(k)$ 、平均自由行程  $\lambda(k)$  も使用する。EXAFS のデータ解析には、フーリエ変換法が高頻度に用いられる。その根拠となるのは、上式において、右辺にサイン関数のシェルごとの和が記されており、そのサイン関数のなかで位相シフトを無視すると  $2\pi k r_j$  になっている点である。従って、 $k\chi(k)$  (実際には  $k^3$  をかけて処理することも多い) のフーリエ変換の強度は、振動成分の周波数分布を与え、そのピークの1つ1つが、基本的には  $r_j$  に対応する。そのため、意味としては動径分布関数に近いものであるが、そのものを与えているわけではないことはよく理解しておく必要がある。図 3.3.6 は、2000 年頃に、EXAFS 国際会議の主要運営メンバーらがデータの取り扱いの標準化に関する専門委員会を作って検討した結果の報告の 1 ページ目のコピーである。そこには、例えば、生データ ( $\mu$  t もしくは  $\chi(k)$ ) を示さずフーリエ変換のデータだけ出すのは科学的に不可であるとか、

フーリエ変換の範囲条件やフィッティングの収束の情報を示さないのは不可といった指摘がなされており、論文の査読を行う際などに、このような注意を論文著者に与えるべきであると書かれている。

図 3.3.7 はセシウム吸着南ア産バーミキュライトのセシウム LIII 吸収端の EXAFS 関数  $\chi(k)$  を示している。解析に使用できる  $k$  の範囲は狭い。このため、フーリエ変換を行っても、得られるピークは必然的にブロードになることに留意する必要がある。すなわち、第 1 近接原子由来の成分を抽出してフィッティングにより構造パラメータを決定する際に、関連予備データの取得も含め、細心の注意が必要である。特に第 1 近接原子に対応するピークが、単一の原子間距離のシェルで考えてよいのか、わずかに異なる 2 つ以上のシェルの重なりと考えるべきなのかは、物理的意味、構造科学的意味を吟味すべきであり、フィッティングの良しあしのみで判断するのは危険である。さらにセシウム LIII 吸収端は Ti K 吸収端に非常に近い位置にある。南ア産バーミキュライト試料にはチタンが含まれており、セシウムを含まない試料でも、Ti K XAFS が測定される。福島産バーミキュライトでは、チタン濃度はさらに高い。共存するチタンのスペクトルの EXAFS 振動の影響も多少なりとも受けることになる。

以上の観点から、本研究では、あえて構造パラメータのフィッティングは行わず、生データでの検討にとどめた。セシウム原子から見て異なる距離にある 2 つのペア (約 3.2 Å および約 4.3 Å の距離) に対応する周波数成分が含まれていることは容易に確かめられる。海外グループの先行研究<sup>3)</sup>で得られている  $\chi(k)$  との比較でも、その点ではよい対応が見られる。2 つの周波数成分に対応する原子間距離の位置に隣接原子 (おそらく酸素であろう) が存在することが、ともかく確認されている。ただし、バーミキュライトと一口に言っても同一物質ではありえないことを割り引いたうえでの議論とする必要はあるし、X 線回折のところでも述べたとおり、異なる構造のものが混在している場合、解釈を誤る危険性が残っている。

## Report of the International XAFS Society Standards and Criteria Committee

D.E. Sayers, Chair

Adopted July 25, 2000

The Standards and Criteria Committee of the IXS presently consists of four subgroups, Beamlines, Data Analysis, Error Assessment and Reporting, and XMCD. The role of each subgroup and the present membership can be found on the IXS web site (<http://ixs.csrrri.iit.edu/>). The committee met in Seattle on July 31 and August 1, 1997 to plan its agenda and to begin its work focusing, in the short term, on a report to the XAFS X Conference in Chicago. It met again in August 1998 in Chicago but did not finalize its report. A third meeting was held at LURE in July 1999 to further discuss both the committee report and the error reporting recommendations as well as to plan the activities prior to the XAFS XI Conference in Japan. It met again in July 2000 to finalize reports for the conference and to plan for the future. This document represents a progress report of the activities for each subgroup of its activities for the past few years. A specific error reporting recommendation will be presented separately.

図 3.3.6 XAFS 国際会議を運営する委員らが提唱する EXAFS データの取り扱いの標準化

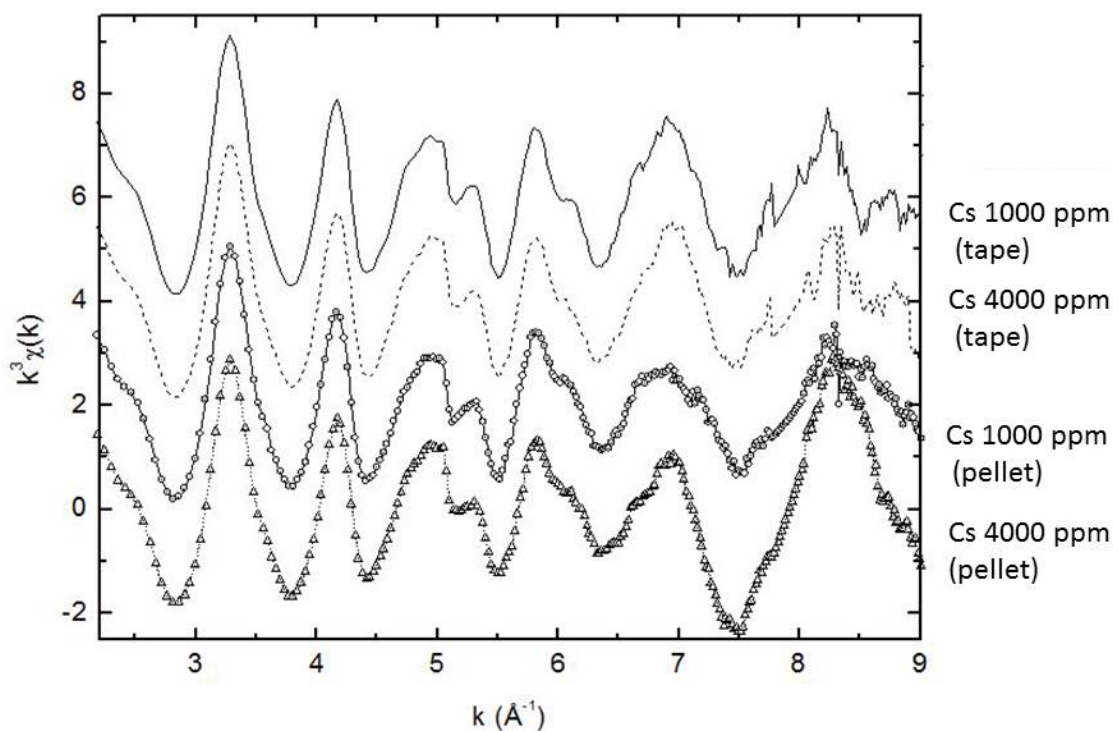


図 3.3.7 セシウム吸着南ア産バーミキュライトのセシウム LIII XAFS

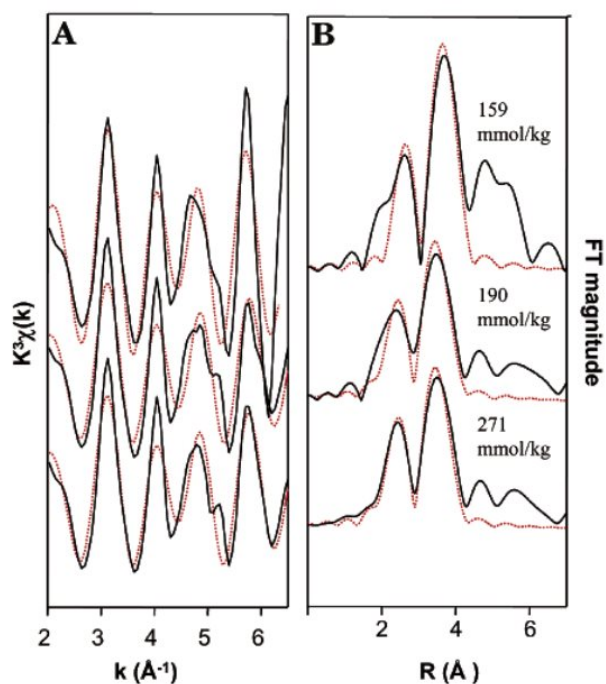


図 3.3.8  
 海外の先行研究で報告されているセシウム吸着バーミキュライトのセシウム LIII XAFS  
 (詳しくは、文献 3) 参照)

#### 3.3.4.1.4 試料の呼称による混乱

本報告では、南ア産バーミキュライトのデータを多く取り上げたが、福島産バーミキュライトについてほぼ同数の実験を行っている。その結果、特に X 線回折のパターンは低角側も高角側も全く異なるものになった。すなわち、名称が同じであっても、実はまったくの別物である。また単相ではなく混合物であり、その混合状態も均一ではなく、粒子サイズ効果があると考えられる。

通常の方法科学の研究でも、合成の結果が単相にならないことや、さまざまな興味深い不均一構造が研究対象になることはある。今回の一連のバーミキュライトの検討は、それを大きくうわまわるもので、未知要素が多くあることをよく認識する必要がある。

### 3.3.4.2 粘土学会標準試料「クニピア」と層状ケイ酸ナトリウム（アイラアイト）のセシウム吸着

粘土学会標準試料「クニピア」は、真っ白のさらさらした微粒子であるが、いったん吸水すると大きく体積膨張し、長時間にわたって保水する。このためセシウム吸着後の X 線回折図形は、そのままでは測定できなかった。図 3.3.9 は、セシウム吸着の後、さらに十分乾燥させてから測定した X 線回折パターンである。ピーク位置の変化、強度の変化等も認められるが、乾燥過程で何が起きたのか、これまでに詳しい検討を行っていないため、生データの報告にとどめておく。「クニピア」の主成分、モンモリロナイトのセシウム吸着については、海外の先行研究で良く調べられているが<sup>3)</sup>、本検討では、高濃度のセシウム吸着には成功していない。

東京都市大学で、水熱法により層状ケイ酸ナトリウム（アイラアイト  $\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ,  $x=8$ ,  $y=10$ ) を合成し、その吸水とセシウムへのイオン交換を試みた。この水による処理でセシウム吸着量が大幅に増えることが今回確認された。図 3.3.10 は示差熱分析の結果を示している。24 時間の水中での攪拌処理を行った試料は、100℃近傍に吸熱ピークを示すことから、水分子が層間に取り込まれたと考えられる。図 3.3.11 は X 線回折の 004 ピーク近傍を見たものである。上述の吸水により、ピーク位置がシフトし、格子面間隔が広がっていることが確認できる。その結果、セシウム吸着率が向上し、かつ、セシウム吸着後には、回折ピークが逆方向にシフトし、イオン交換の後に格子面間隔が狭まっていることがわかる。

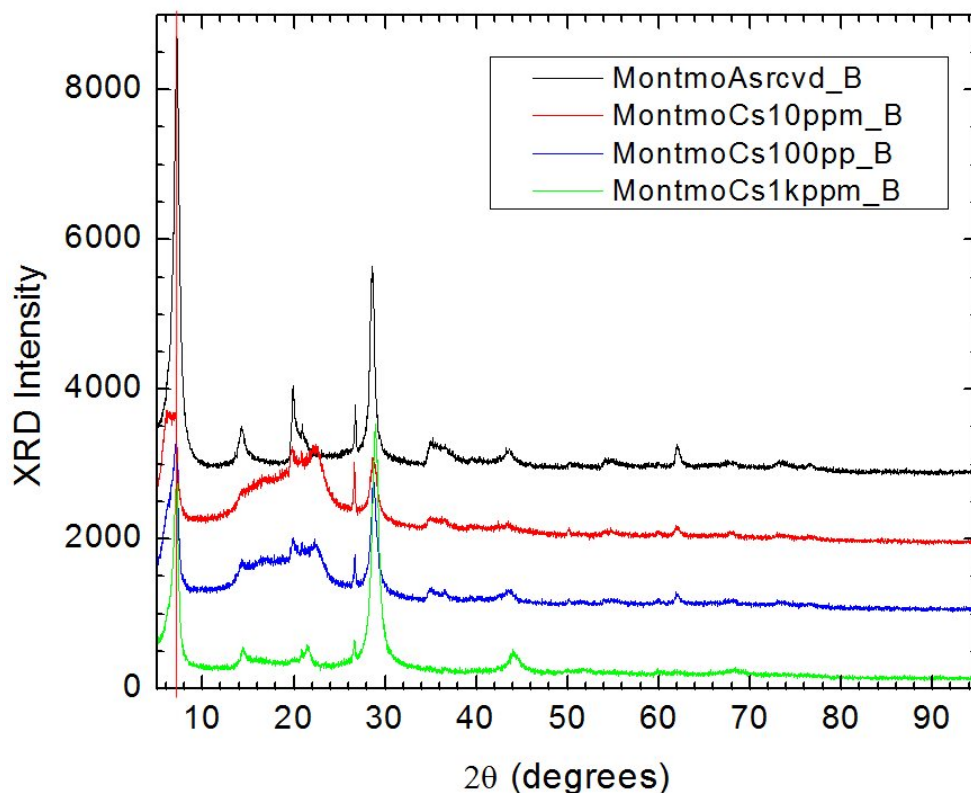


図 3.3.9 セシウム吸着「クニピア」の X 線回折データ

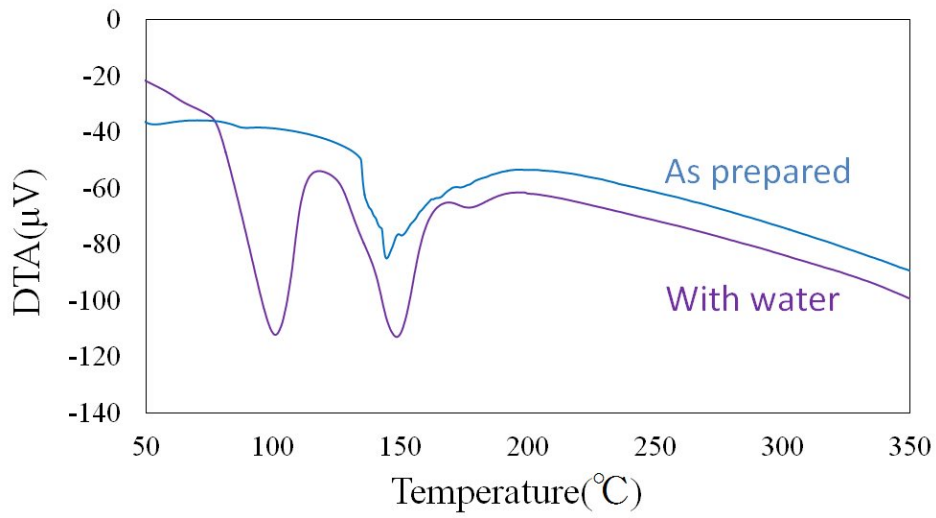


図 3.3.10 層状ケイ酸ナトリウム（アイライト）の示差熱分析データ

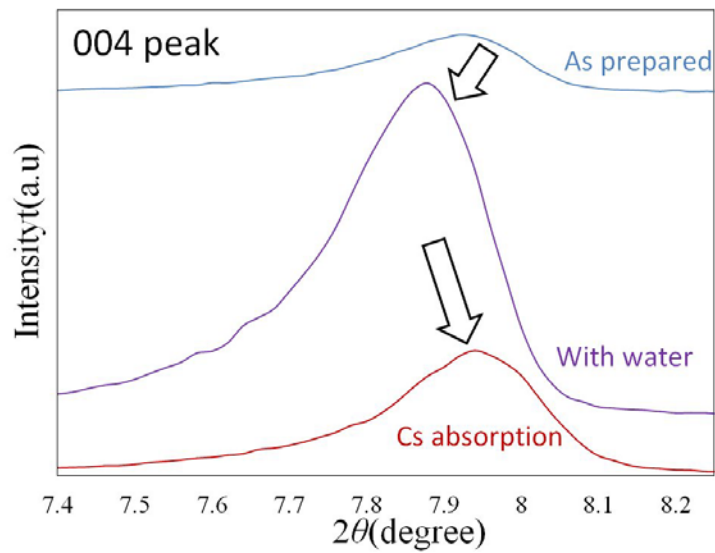


図 3.3.11 層状ケイ酸ナトリウム（アイライト）の X 線回折データ

### 3.3.5 実施研究のまとめ

セシウム吸着パーミキュライト等についてこれまでに得られたX線データをもとに、セシウム吸着メカニズムと構造の関連を検討するうえで留意すべき事項の整理を行った。海外の先行研究と比べて大筋においては違わない結果が得られながら、より進んだ、より定量的な解析を行うには、多くの障害がある。おそらく、その1つのキーワードは化学組成および構造の不均一性である。これらをひとまとめにした「平均」と見なすことによる限界がいろいろな形で現れることになる。このため、1つの重要な方向は、空間分解能を持つ分析技術、特にX線イメージングの活用が重要である。その場合でも、情報は3次元的ではないことや、定量解析にはいくつもの前提があることに留意する必要がある。他方、上記の懸念は、適切に選ばれているという条件がつくが、**well defined** なモデル試料を多くとりあげ、詳しい定量的な検討を行うことによってもある程度救済することができる。おそらく、このような点は本プロジェクトを運営する人々の叡智により解決されうる点であろう。

これまで検討を行ってきたパーミキュライトと比較する問題意識を持って、粘土学会標準試料「クニピア」(天然モンモリロナイト、クニミネ工業)および、層状ケイ酸ナトリウム(アイラアイト)のセシウム吸着を調べた。

### 3.3.6 今後の課題

おそらく東京理科大の発表した研究のように、今後の分析では、蛍光X線スペクトル、X線回折、XAFS(透過法、蛍光X線法)のいずれも、1ミクロン以下のビームを使って、数~10ミクロン程度の視野の中での不均一分布を見るのが重要と考えられる。実試料に近いものについて、特にそのような観点を強調する必要がある。その際、迅速なイメージング技術の利用も重要になるだろう。他方、それだけで、まったく未知のメカニズムが解明されるとは想像しにくい。適切な**well defined** なモデル試料(純物質、単相であること等は当然として、結晶方位や欠陥分布も制御)を最新の解析技術で検討する努力が求められる。X線技術について言えば、通常のX線回折、それも指紋法の域を出ないような解釈にとどまる検討ではなく、吸着サイトの位置決定なども含めた精密解析を視野に入れなくてはなるまい。

### 3.3.7 参考文献

- 1) B. L. Sawhney, Nature, 211, 893 (1966).
- 2) M. E. Harward, D. D. Carstea and A. H. Sayegh, Clays and Clay Materials, 16, 437 (1969).
- 3) B.C. Bostick, M.A. Vairavamurthy, K.G Karthikeyan and J. Chorover, Environ. Sci. Technol. 36, 2670 (2002).
- 4) 物質・材料データベース (MatNavi)  
<http://mits.nims.go.jp>
- 5) Y.Abe et al., Anal. Chem., 86, 852 (2014).
- 6) [http://ixs.セシウム.rri.iit.edu/IXS/subcommittee\\_reports/s\\_セシウムC00report.pdf](http://ixs.セシウム.rri.iit.edu/IXS/subcommittee_reports/s_セシウムC00report.pdf)

### 3. 4 ESR 法による Cs-スメクタイトの検討

#### 3. 4. 1 研究報告の概要

Cs 特異吸着サイトのナノ材料科学による検討には、様々な取り組みからの検討が必要と考えられる。本委託研究においても TOF-SIMS・分析電子顕微鏡さらには各種 X 線技術による検討を進めた。本研究では、あらたなアプローチとして ESR（電子スピン共鳴）法による Cs を含む各種合成スメクタイトを検討し、スメクタイト中の Cs の存在状態、他の競合陽イオンの存在下での選択性に関して検討した。

#### 3. 4. 2 実施報告の背景・目的

核燃料棒を包み込んだジルコニウム管の損傷による原子炉反応容器の一次冷却システムからの核分裂によって生じた放射性核種の効果的な除去は、原子力発電所事故への対策として必要不可欠である。

粘土鉱物は、長寿命放射性核種、例えば 137-Cs, 90-Sr, 129-Ag などを冷却水中から分離する吸着材として注目されてきた。粘土鉱物は、また核分裂生成物が地下水等への環境水へ移行するのを抑制・防止するためのバリアー材としても注目されてきた。

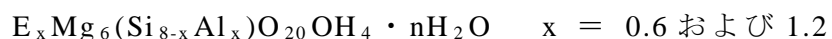
しかしながら、放射性陽イオンの粘土鉱物中での存在状態、化学的安定性に関する知識は十二分とは言えない。特に粘土鉱物の層間の陽イオン交換サイトに異なる陽イオン種が共存した場合の陽イオンの競合・選択性については不明な点が多い。

このような背景のもと、 $\gamma$  線照射後のスメクタイト中の Cs および Ag の存在状態を ESR 法により検討した。

#### 3. 4. 2 試験方法

##### ・スメクタイトの合成・特徴づけ

層電荷の異なる以下の構造化学組成式であらわせる 2 種のスメクタイト（サポナイト）を調整した。



試薬 ( $Na_2CO_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  および  $SiO_2$ ) を無水 Na 型サポナイト組成 ( $x=0.6, 1.2$ ) に調整した混合物を白金ルツボに詰め、 $1700^\circ C$  で 1 時間保持した後、水中にて急冷してガラス化した。急冷ガラスは粉碎後、 $10\mu m$  以下の粒径に水ヒシ、出発物質とした。出発物質と蒸留水を固液比 1 : 1 で金管に封入し、反応温度  $300^\circ C$ 、保持時間 7 日、圧力 100MPa で水熱処理した。

不定方位試料、EG 処理試料およびアルキルアンモニウム交換処理後試料に対する XRD 解析の結果、 $x=0.6$  の試料は典型的なサポナイト、 $x=1.2$  の試料は高層電荷サポナイトと判定できた。詳細は、前年度の報告を参照いただきたい。以下これらの as-grown の  $x=0.6$  の試料および  $x=1.2$  の試料を、それぞれ、Sap Na<sub>0.6</sub> および Sap Na<sub>1.2</sub> と略称する。

##### ・ESR 用試料および測定法

上記サポナイトおよび高層電荷サポナイトへ、Ag イオン及び Cs イオンを担持させた。それぞれ硝酸銀水溶液および塩化セシウム水溶液を用いた陽イオン交換法により調整した。陽イオン交換前および交換後の試料は、超高純度石英管 (SPECTROSIL 管)

に入れたのちに、真空ラインを用いて脱ガス処理を行った。その後石英管を溶封し、60-Co源（5kGy）を用いて77Kでガンマ線照射を行った。

ESRスペクトルは、測定温度可変型のBruker社（現Bruker Biospin社）製ESP 300を用いて、77Kでガンマ線照射後、100K～200Kにて測定して得た。

### 3.4.3 実施研究の結果

#### ・Na-サポナイト及びNaCs-サポナイトのESR測定

77Kでのガンマ線照射後、100K及び200Kにて測定して得たSapNa<sub>1.2</sub>およびその層間のNaイオンの一部をCsでイオン交換した試料（SapNa<sub>1.2</sub>Csと以後示す）のESRスペクトルを図3.4.1に示す。さらにサポナイト表面でのOHサイト（図3.4.2）<sup>1)</sup>に生じる酸素ラジカル等のシュミレーション結果（図3.4.1下部に赤色で示す）も併せて示す。

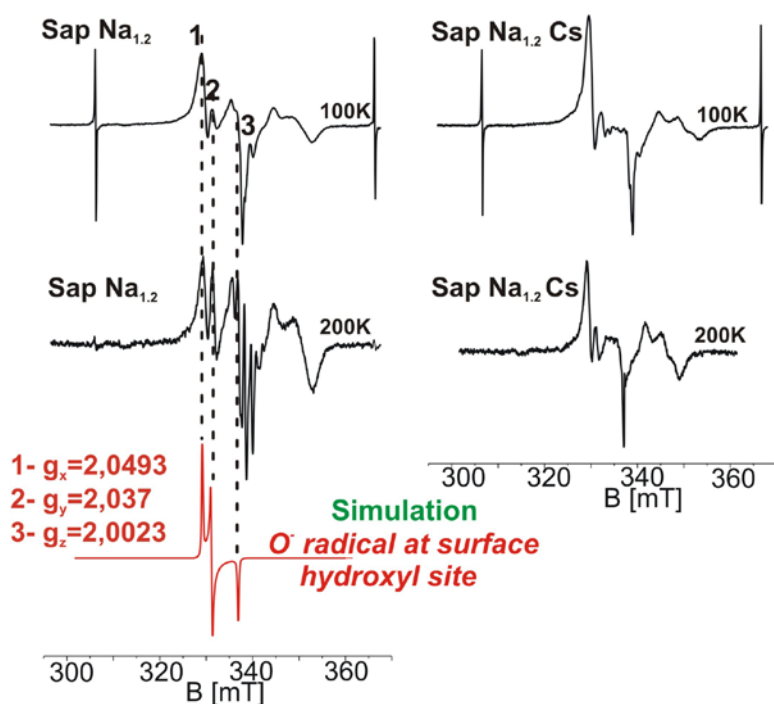


図 3.4.1 Na-サポナイト及び NaCs-サポナイトの ESR スペクトル

2種類の酸素ラジカル（O(1)およびO(2)）が、77Kでのガンマ線照射後、100KでSapNa<sub>1.2</sub>において観測できた。200Kまで測定温度を上昇させると、O(1)ラジカルの強度が増加し、さらにg=2.000領域に多重スペクトルが観測された。一方、SapNa<sub>1.2</sub>Csでは、200Kまで測定温度を上昇させてもスペクトルに変化は認められなかった。

g=2.0493で特徴付けられるO(1)ラジカルは、サポナイト層間の表面に位置するOHからHが取り除かれ形成されたと解釈できる。また、g=2.037で特徴

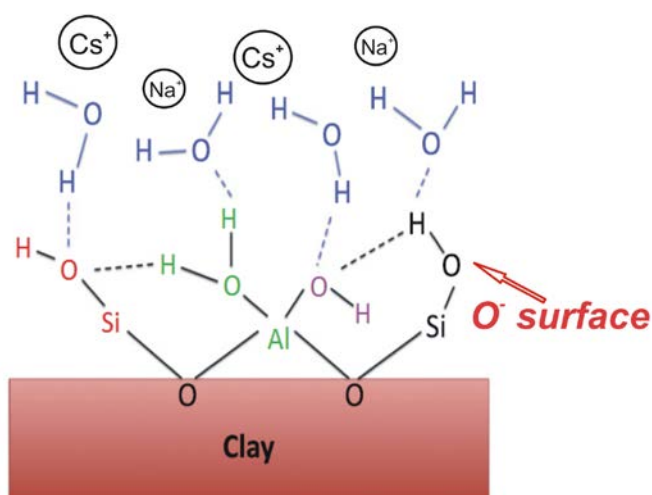
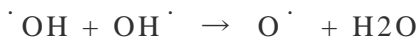


図 3.4.2 サポナイト表面に生じる OH サイトおよび酸素ラジカル<sup>1)</sup>

付けられる O(2) ラジカルは、180K への温度上昇により観測された。O(2) ラジカルは、温度上昇により OH ラジカルが動きやすくなり、以下の反応



により生成したと考えられる。一方、SapNa<sub>1.2</sub>Cs 試料において O(2) ラジカルが観測されないのは、イオン半径が 0.167nm と大きな Cs イオンによって、OH ラジカルとの OH 基への近接が阻害されたためと考えられる。

・層電荷の異なる Sap Na<sub>0.6</sub> および Sap Na<sub>1.2</sub> の ESR 測定

Sap Na<sub>0.6</sub> および Sap Na<sub>1.2</sub> 試料を 77K でのガンマ線照射後、200K にて測定して得たスペクトルを図 3.4.3 に示す。Sap Na<sub>1.2</sub> 試料のスペクトルに明らかなように、g=2.000 領域に多重スペクトルのライン数が増加した。従ってこれらの多重スペクトルは、試料に含まれる Na イオンの 3/2 核スピンと OH ラジカルとの相互作用と解釈できる。すなわち、Sap Na<sub>0.6</sub> 試料では、OH ラジカルは 1 個の Na イオンと相互作用を持つのに対して、Sap Na<sub>1.2</sub> 試料では OH ラジカルは 2 個の Na イオンと相互作用を持つと判断できる。

また特徴的に、層間に Na イオンのみを含む Sap Na<sub>0.6</sub> および Sap Na<sub>1.2</sub> 試料では、H 原子（図中 H<sup>0</sup> と示す）を 200K においても安定化することができた。しかしな

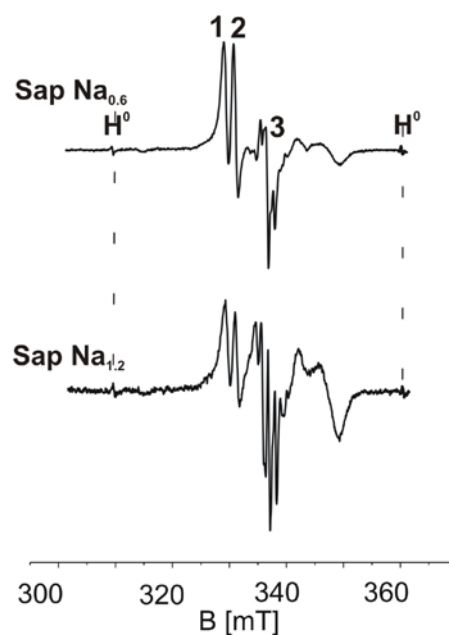


図 3.4.3 層電荷の異なるサポナイトの ESR スペクトル

がら、層間に Cs イオンを含む試料においては、H 元素の安定化は認められなかった。従って、サポナイト層間中の H 原子のトラップ席は、層間の陽イオン種により修飾されると判断できる。

・ Na イオン, Ag イオン, および Cs イオンが共存する場合のサポナイトの ESR 測定 as-grown の層間に Na イオンを含むサポナイト, 陽イオン交換により Ag イオンを担持させた試料, Cs イオンを担持させた試料を, 77K でのガンマ線照射後, 160K にて測定して得たスペクトルを図 3.4.4 に示す。

Ag イオンを含む試料の  $g=2.000$  領でのスペクトルには, 変化は見られない。但し, Ag 原子 (図中  $Ag^0$  と示す) に伴う二重線が見られるだけである<sup>2)</sup>。一方, Na イオン, Ag イオン, および Cs イオンが共存する場合のサポナイトでは, O(1) ラジカルの強度が増加すると共に, 隣接する原子核の核スピンとの相互作用による  $Ag^0$  二重線の微細構造がより明確となった。但し, 残念ながら Cs に伴う常磁性化の ESR スペクトルは観測されなかった。

Na イオン, Ag イオン, および Cs イオンを含むサポナイトにガンマ線照射を行うことにより得られる常磁性化の違いは, 粘土鉱物サポナイト中でのそれぞれのイオンの専有席を特徴づけるのに有用な方法の一つと考えられる。

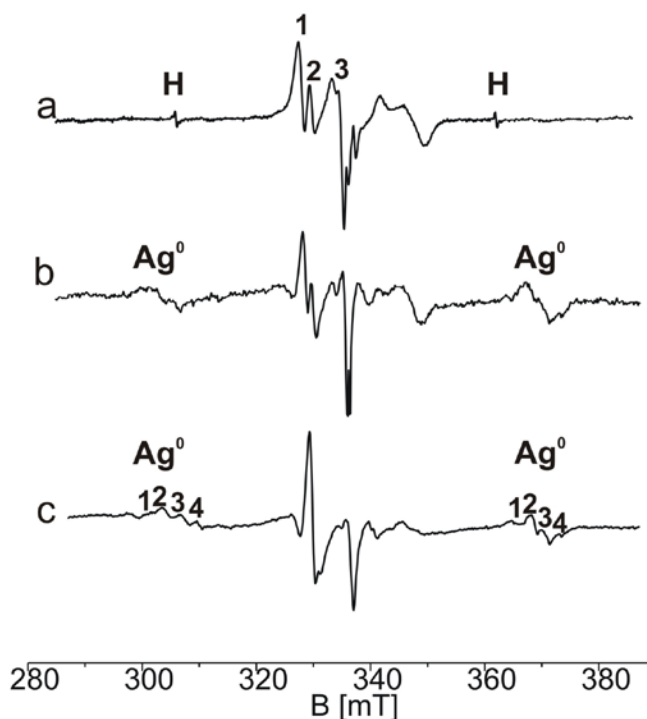


図 3.4.4 Na-イオン, Ag-イオンおよび Cs-イオンが共存するサポナイトの ESR スペクトル

#### 4. 1. 8 参考文献

- 1) S. Tazi, B. Rotenberg, M. Salanne, M. Sprik, and M. Sulpizi: *Geochemica Cosmochemica Acta* **94**, 1-11 (2012).
- 2) H. Yamada, J. Sadlo, K. Tamura, S. Shimomura, J. Turek, and J. Michalik, *Nukleonika*, **49**, 131-136 (2004).

#### 4. 1 合成バイデライトー白雲母系粘土鉱物の Cs の吸着挙動

##### 4. 1. 1 研究報告の概要

放射性 Cs の天然環境における吸着・固定メカニズムを材料科学・粘土科学の立場より解明するためには、検討すべき「標準物質」となる粘土鉱物が必須である。本研究では、材料科学の面から、その化学組成・層電荷・結晶度を精密に制御した合成粘土鉱物、二八面体型粘土鉱物（バイデライトー白雲母系）を水熱条件下で合成し、その粘土鉱物学的特徴づけとその Cs 吸着挙動を検討した。また、これらの標準物質は、他の先端的材料科学的手法による放射性 Cs の粘土鉱物への吸着メカニズムの解明に供し、除染・減容化に貢献できると考えている。

##### 4. 1. 2 実施報告の背景・目的

従来より、粘土鉱物が  $Cs^+$  等陽イオンを強く吸着することは知られており<sup>1,2)</sup>、今回の汚染においても環境中の放射性 Cs の多くは土壌中の微粒子、粘土鉱物に比較的強固に吸着し、その微粒子とともに定着もしくは移行すると考えられている。特に、2:1 型構造と称される層状粘土鉱物が主な吸着鉱物として注目されている。しかしながら、その吸着メカニズムは、材料科学・粘土科学からは詳細には明らかにされていないのが現状である。

2:1 型構造と称される層状粘土鉱物は、 $AlO_6$  や  $MgO_6$  などの八面体が稜を共有して結合し、網状のつながりの八面体シートを、互いに向き合った二枚の六角形網状構造に配列したケイ素四面体シートにはさまれて形成した 2:1 層がくり返し積み重なることによって形成される（図 4.1.1）。2:1 型層状ケイ酸塩は「2:1 層の内部の同形置換による負の電荷」を持ち、層間に「正の電荷を有する陽イオン」を挟んでいる。この負電荷を層電荷と定義し、構造化学組成式あたりの電荷の絶対値で、スメクタイト・パーミキュライト・マイカ（雲母・雲母粘土鉱物）と分類される（表 4.1.1）。

以上の観点から、本研究では 2:1 型層状粘土鉱物への Cs 吸着メカニズムの詳細な検討に必須な「標準物質」として、二八面体型粘土鉱物（バイデライトー白雲母系合成鉱物）に注目し、その鉱物学的特徴付けと共にその Cs 吸着挙動を検討した。

二八面体型粘土鉱物の代表的なバイデライトー白雲母系列の理想構造化学組成式は、式（1）と表現できる。



$x=0.66$  の場合が理想バイデライト組成であり、 $x=2$  の場合が理想白雲母組成である。 $E_x$  は層間陽イオンである。今回は、 $E_x$  として Na を選び、 $x=0.6\sim 2$  と変化させた一連の層状ケイ酸塩を水熱条件下で合成し、その中から層電荷の異なるスメクタイト、雲母

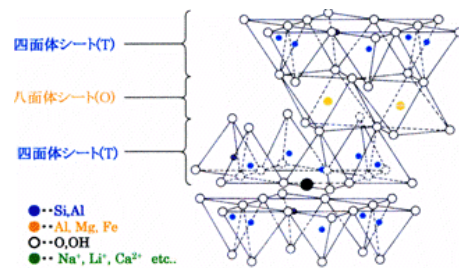


図 4.1.1 2:1 型層状ケイ酸塩の模式図

鉱物	層電荷
パイロフィライト・タルク	0
スメクタイト	0.2~0.6
パーミキュライト	0.6~0.9
雲母、雲母粘土鉱物	0.9~1

表 4.1.1 2:1 型層状ケイ酸塩の分類

の Cs 吸着特性を評価した。

#### 4. 1. 3 試験方法

##### ・水熱合成

いわゆるゾル・ゲル法（ハミルトン&ヘンダーソン法）<sup>3)</sup>に従って出発物質を以下にて調整した。

- ① 化学組成式 (1) の必要量の  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  をテフロンビーカー中にて純水に溶解し、その後必要量の  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を加え、硝酸塩水溶液とする。
- ② 必要量の TEOS（オルトケイ酸エチル）を秤量後、約 20% 程度のエタノールを加え、50℃ 程度にて均質溶液とする。
- ③ 硝酸塩水溶液①をテフロンビーカー②の中身に加え、十分に攪拌する。
- ④ 攪拌しながら、1:1 アンモニア水を少しずつ加え、全体をゲル化させる。
- ⑤ テフロンビーカーにラップをかけ、1 晩放置しゲルの熟成を行う。
- ⑥ ゲルをまずホットプレート上で乾燥させる。
- ⑦ 乾燥したゲルを乳鉢で粉にし、白金蒸発皿に移し、電気炉にて 150℃ から徐々に温度を上げ加熱処理を行う。
- ⑧ 脱 NOx 反応を完全に行い、700℃ にて一晩保持する
- ⑨ 徐冷後、回収したゲルを出発物質とする。

出発物質と蒸留水を固液比 1:1 で金管に封入し、100MPa で水熱処理（反応温度、保持時間は、表 4.1.2 に示す）した。合成した試料は、式 (1) の x の値に応じてそれぞれ、Beid0.6, Beid0.9, Beid1.3, Beid1.6, および Mus と以下では略する。

表 4.1.2 Cs 吸着実験用二八面体型粘土鉱物

サンプル名	合成物	出発物質	合成条件		
			温度 (°C)	圧力 (MPa)	保持時間 (日)
Beid0.6	バイデライト	X=0.6	350	1000	8
Beid0.9	高電荷二八面体型 スメクタイト	X=0.9	350	1000	8
Beid1.3	高電荷八面体型ス メクタイト	X=1.3	350	1000	8
Beid1.6	二八面体型雲母	X=1.6	450	1000	7
Mus	二八面体型雲母	X=2.0	450	1000	10

\* 出発物質：式 (1) の X の値で示す。

・ Cs 吸着実験

前報<sup>4)</sup> の手順に従って行った。1~600ppm の任意の濃度の CsCl 水溶液を調製した。試料粉末を 0.3g 秤量し、30mL の吸着質水溶液と共に遠沈管に入れ良く攪拌する。25°C で転倒回転式の攪拌機により 40rpm の回転速度で 24 時間攪拌した。反応後は、遠心分離機により固液分離して上澄み液を 0.45 μ m 孔径のフィルターでろ過して液相を回収した。液相の Cs 量は誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS) により測定し、以下の式より Cs 吸着率 (%) を求めた。

$$\text{Cs吸着率 (\%)} = (C_0 - C) / C_0 \times 100 \quad \dots (2)$$

(C<sub>0</sub> = 初期濃度, C = 平衡濃度)

固液分離後の固体試料は、凍結乾燥後 XRD 測定を行った。

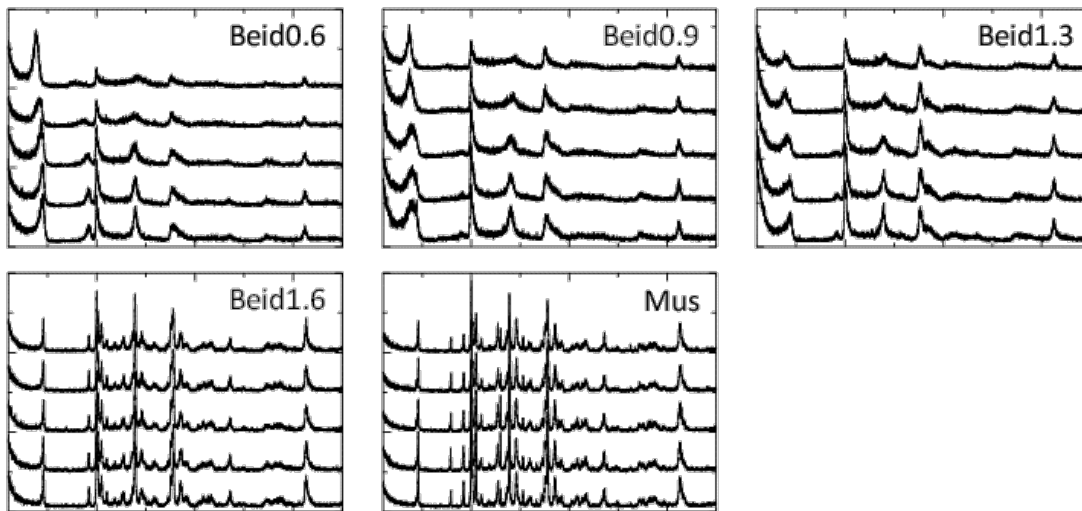


図 4.1.2 CsCl 水溶液で処理した後の XRD パターン。各試料において、下から上のパターンで水溶液中の Cs 濃度 (1,10,100,300,600) に応じたパターンを示す。

4. 1. 4 実施研究の結果

・ XRD 法の結果

任意の濃度の CsCl 水溶液で処理した後の XRD パターンを図 4.1.2 に示す。

Beid0.6, Beid0.9, および Beid1.3 の XRD パターンは、所謂スメクタイトの XRD パターンと一致した。従って、その出発物の化学組成より、Beid0.6 はバイデライト、Beid0.9, および Beid1.3 は、高電荷二八面体型スメクタイトと同定できる。Beid1.6, および Mus は、二八面体型雲母と同定できる。また、Cs イオン吸着前後での XRD パターンに関しては、Beid0.6, Beid0.9, および Beid1.3 については底面反射の変化のみが認められ、その他の変化は認められなかった。一方 Beid1.6, および Mus については変化は認められなかった。従って、イオン交換処理により相変化はないと判断できる。

前年度実施した三八面体型粘土鉱物 (サポナイトー金雲母系) においては、層電荷の増加と共に、サポナイト、高電荷三八面体型スメクタイトから、三八面体型パーミキ

ユライト様相の出現が認められた。今年度の二八面体型粘土鉱物（バイデライトー白雲母系合成鉱物）においては、XRD 解析からはバーミキュライト様相は認められなかった。この点については、合成物の化学組成の検討、アルキルアンモニウム法による膨潤挙動の検討がさらに必要と考える。一方で、合成条件（出発物質の化学組成・合成温度・保持時間など）の再検討も必要と判断できる。

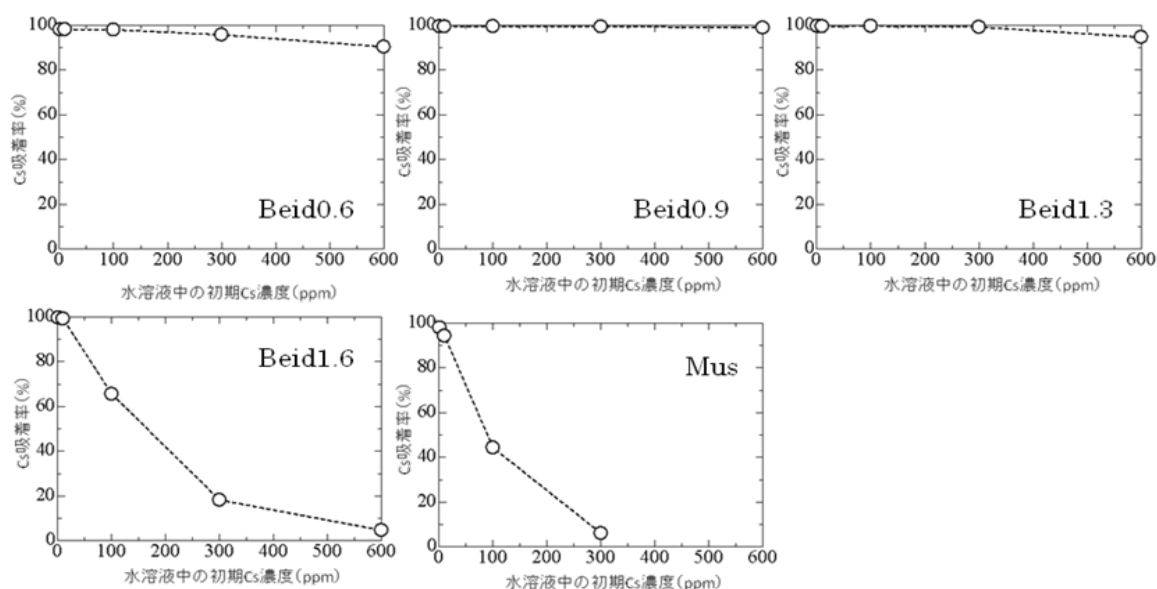


図 4.1.3 Cs 吸着率と水溶液中の初期 Cs 濃度との関係

#### ・ Cs 吸着挙動

Beid0.6, Beid0.9, Beid1.3, Beid1.6, および Mus のを, 図 4.1.3 に示した。

Beid0.6 (バイデライト) の Cs 吸着率は, 初期濃度 100ppm 以下では 98% 以上の高い値を示した。初期濃度の増加 (300ppm から 600ppm) に伴っても, 吸着率は 96% から 90% 程度への低下しか認められなかった。前年度のポナイトの Cs 吸着挙動に比較して高い吸着率を示した。またモンモリロナイトに比較しても, 初期濃度の増加に伴う吸着率の低下は低かった。これらの挙動の違いが, 三八面体型と二八面体型スメクタイトとの構造, 結晶性・粒度等に依存するかどうかは, 今後のさらなる検討が必要である。

高電荷二八面体型スメクタイト (Beid0.9 および Beid1.3) の吸着率と初期濃度との関係は, ほぼ同一であった。初期濃度 300ppm 以下では, その Cs 吸着率はほぼ 100% の高い値を示した。初期濃度 600ppm においても, Beid0.9 および Beid1.3 のそれぞれの Cs 吸着率は, 99% と 95% と高い値を示した。これらの高 Cs 吸着率は, 前年度の高電荷三八面体型スメクタイトよりも高く, 三八面体型バーミキュライト様相と同等とみなせる。層電荷が比較的低い, 所謂スメクタイト相においても高 Cs 吸着率が二八面体型粘土鉱物において確認できたことは, 高性能 Cs 吸着材の開発, さらに天然土壌に置くみられる二八面体型粘土鉱物における Cs の特異吸着挙動の解明への標準試料としての可能性を

示唆している。

Beid1.6 の Cs 吸着率は、初期濃度 10ppm 以下では 99% 以上の高い値を示した。しかし、初期濃度 300ppm で吸着率は 65% と低下した。さらに高濃度領域では、18% (300ppm) から 5% (600ppm) と大きく低下した。これらの挙動は、一般的な雲母に期待できるものであり、XRD 解析による二八面体型雲母との同定結果とも一致する。

Mus (白雲母) の Cs 吸着率は、初期濃度 1ppm で 98%、10ppm で 94% の高い値を示した。しかし、初期濃度 300ppm で吸着率は 44% と低下し、300ppm では 6% と大きく低下した。交換性陽イオンを有しない雲母の挙動としては解釈できる。しかしながら、XRD 解析によって同じく二八面体型雲母と同定された Beid1.6 の 300ppm 以上での Cs 吸着挙動と異なっている。雲母の Cs 吸着サイトのさらなる検討が必要と考えられる。

#### 4. 1. 5 実施研究のまとめ

放射性セシウムの粘土鉱物への詳細な吸着メカニズムを解明するために必須である「標準物質」としての合成粘土鉱物について検討した。

化学組成・層電荷・結晶度を精密に制御した合成粘土鉱物として、二八面体型粘土鉱物 (バイデライトー白雲母系合成鉱物) を水熱条件下で合成し、その XRD 分析による特徴づけと、その Cs 吸着挙動を検討した。層電荷が比較的低い、所謂スメクタイト相においても高 Cs 吸着率が二八面体型粘土鉱物において確認できたことは、高性能 Cs 吸着材の開発、さらには天然土壌に置くみられる二八面体型粘土鉱物における Cs の特異吸着挙動の解明への標準試料としての可能性を示唆している。

#### 4. 1. 7 今後の課題

先端的分光分析、TEM、SIMS 等による検討、さらに吸着脱離検討特にホット試験用サンプルとしての標準試料は必須と考えられる。

標準試料の今後の課題としては、

- ① 合成試料では二八面体型粘土鉱物 (バイデライトー白雲母系合成鉱物) に関して、その層電荷・結晶性等の制御に成功しており、試料配布は十分に期対応できる。
- ② いわゆる二八面体型パーミキュライトの合成には成功していない。合成条件の再検討が必要と考えられる。
- ③ Cs 特異的な不可逆吸着サイトについて、ある特定の構造・サイト (所謂フレイドエッジサイトなど) が指摘されている点に対して、人工的な特異サイトの創製の検討も必要と考える。この点については、所謂フレイドエッジサイトの成り立ちに対しての粘土鉱物の組成依存性 (八面体イオンの Ti もしくは Fe などの部分置換など) を考慮した合成試料を検討すべきと考える。

#### 4. 1. 8 参考文献

- 1) A. Maes, D. Verheyden and A. Cremers: *Clays and Clay Minerals* **33**, 251 (1985).
- 2) A. Cremers, A. Elsen, P. De Preter and A. Maes: *Nature* **335** 247 (1988).
- 3) D. Hamilton and M. Henderson: *Mineral. Mag.*, **36**, 832-838 (1968).
- 4) (独) 物質・材料研究機構マテリアルデータベースサイト (MatNavi), <http://mits.nims.go.jp> (2011).

## 4. 2 風化黒雲母の Cs の吸着挙動

### 4. 2. 1 研究報告の概要

福島県内の農地土壌に比較的多く含まれる風化黒雲母は、福島第一原発事故により環境中に放出された放射性 Cs を吸着・固定する物質として注目されている。福島県田村郡小野新町周辺に産出する変質度・風化度の異なる「風化黒雲母」に注目し、昨年度の予備的検討を踏まえ、それらの Cs 吸着挙動を詳細に検討した。その結果、Cs 吸着特性と風化黒雲母の風化度との相関を明確にすると共に、風化黒雲母中に含まれるバーミキュライト、ヒドロバイオタイト（規則型雲母/バーミキュライト混合層鉱物）および積層不整を示す黒雲母が、Cs 吸着挙動に関して重要な役割を果たしていることを示した。

### 4. 2. 2 実施報告の背景・目的

先の報告<sup>1)</sup>によれば、福島県田村郡小野新町を中心として「南北 16km, 東西 1~1.5km」の地区内にバーミキュライト鉱床が確認されていた。残念ながら現在は、福島バーミ（株）のみが稼働中の鉱床である。これらの鉱床は、閃雲花崗閃緑岩の風化残留鉱床であり、風化帯は地表から 10~40m の深さに達している。閃雲花崗閃緑岩の主成分鉱物は、黒雲母・角閃石・石英・斜長石・正長石で、副成分鉱物は、燐かい石・ジルコン・褐レン石などである。鉱石の原型である黒雲母は、2mm 大以上のもので、重量比にして 1~20% 程度に変化

している。本研究で検討した風化黒雲母は、この黒雲母の仮像として生成している。本年度は、小野新町周辺に産出する変質度・風化度の異なる 4 種の風化黒雲母（図 4.2.1）に関して、その粘土鉱物学的特徴づけを行うと共に、その風化度・変質度と Cs 吸着挙動との相関を詳細に検討した。

### 4. 2. 3 試験方法

風化度の異なる 4 種の風化黒雲母は、以下の手順により調整した。各地点（百目木（どうめき）、戸沢、万景、谷津作）より風化表層土壌を採集し、100 °C で一晩乾燥した後、2mm メッシュで篩分けした。2mm 以上の試料より、ハンドピッキングにより黒雲母の仮像として生成している風化黒雲母を分け、蒸留水と共にミキサーで湿式粉碎した。粉碎試料は、その後水篩操作により、2 $\mu$ m 以下の試料を回収・遠心分離・凍結乾燥で行い、XRD 測定および Cs 吸着実験に供した。

XRD 測定サンプルは、以下の手順により作成し、風化黒雲母中のバーミキュライト、

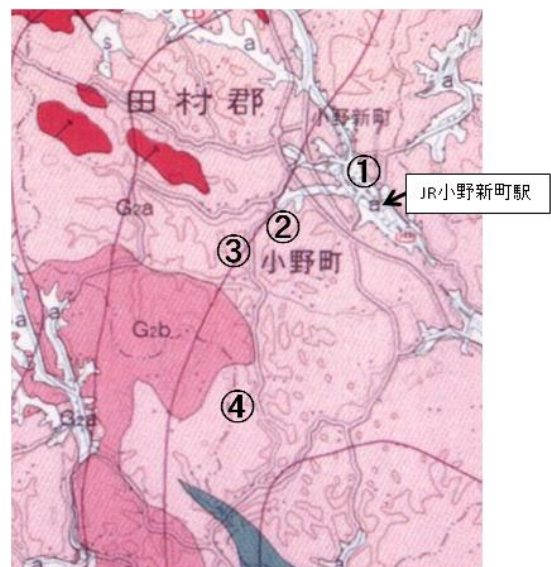


図 4.2.1 福島県田村郡小野新町周辺での風化黒雲母の採集地点。①万景（小野新町小）②谷津作③百目木（どうめき）④戸沢。（独）産業技術総合研究所・地質調査総合センターによる「地質図 Navi」<sup>2)</sup>よりの地質図に示した。

ハイドロバイオタイト（規則型雲母/バーミキュライト混合層鉱物）および積層不整を示す黒雲母を同定した（表 4.2.1）。水簸操作により、2 $\mu\text{m}$  以下とされた試料は、1 M 塩化マグネシウム水溶液を用いて 3 回イオン交換・遠心分離の後、純水による洗浄・遠心分離を行う。その後、スライドガラス上に定方位試料とし、エチレングリコールと共に密封容器に入れ、60 $^{\circ}\text{C}$  で 3 日間保持した。

表 4.2.1 風化黒雲母の XRD パターンによる同定方法

	$d_{001}(\text{nm})$
Biotite	1.0 (sharp peak)
Distorted biotite	1.0 (broad peak)
Vermiculite	1.4
Hydrobiotite (Regularly interstratified biotite-vermiculite)	2.4
Randomly interstratified biotite-vermiculite	1.2

Cs 吸着実験は、前報<sup>3)</sup> の手順に従って行った。0.1~1000ppm の任意の濃度の CsCl 水溶液を調製した。試料粉末を 0.3g 秤量し、30mL の吸着質水溶液と共に遠沈管に入れ良く攪拌する。25 $^{\circ}\text{C}$  で転倒回転式の攪拌機により 40rpm の回転速度で 24 時間攪拌した。反応後は、遠心分離機により固液分離して上澄み液を 0.45  $\mu\text{m}$  孔径のフィルターでろ過して液相を回収した。液相の Cs 量は誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS) により測定し、以下の式より Cs 吸着率 (%) を求めた。

$$\text{Cs吸着率}(\%) = (C_0 - C) / C_0 \times 100 \quad \dots (2)$$

( $C_0$  = 初期濃度,  $C$  = 平衡濃度)

#### 4.2.4 実施研究の結果

##### ・XRD 法による試料の同定

エチレングリコール処理後の各試料（百目木（どうめき）、戸沢、万景、谷津作）の X 線回折パターンを図 4.2.2~4.2.5 に示す。

百目木試料の底面反射（図 4.2.2）は、雲母の底面反射と同様に 1.0nm を示した。但しその半価幅は、風化されていない新鮮な雲母の半価幅の約 8 倍であり、低結晶粘土鉱物と称されるスメクタイトの半価幅と同様である。黒雲母の風化初期段階では、黒雲母結晶の積層が不整となったり、層分離が生じることが透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察で認められている<sup>4)</sup>。また、黒雲母より層間陽イオンの K イオンが溶出することにより、層構造の分離が生じ、その溶出によりバーミキュライト層が生成することが観測されている<sup>4)</sup>。このような黒雲母の構造・層の「ゆがみ」は、底面反射の半価幅の広がりによって判定することができる。以下では、このような風化黒雲母を、**distorted** 黒雲母 (biotite) を略して **DB** と呼ぶこととする。

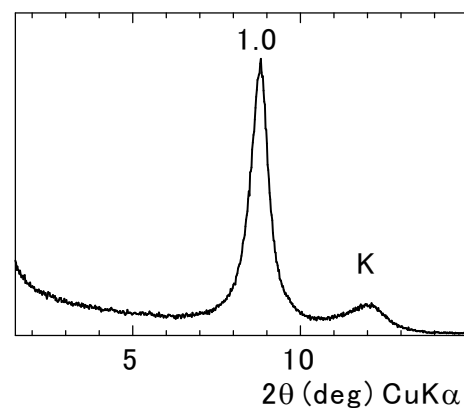


図 4.2.2 百目木試料の XRD パターン. K:カオリナイト.

戸沢試料の底面反射(図 4.2.3)の半価幅は、百目木試料の半価幅の約 2 倍あり、百目木試料と同様に、DB の存在が認められる。さらに、4° あたりのバックグラウンドの増加が認められる。このような底面反射の半価幅の増加およびバックグラウンドの増加は、戸沢試料の風化度が、百目木試料より進んでいることを示唆している

万景試料の XRD パターンは、戸沢試料と同様に DB の存在、スメクタイトの出現 (1.7nm) に加えて、特徴的な 2 本の反射 (2.4nm, 1.1nm) が認められた (図 4.2.4)。2.4nm 反射は、 hidroバイオタイト (黒雲母層とバーミキュライト層の 1:1 型規則型混合層鉱物) と同定できる。また、1.1nm 反射は、 hidroバイオタイトの 002 反射および不規則型黒雲母/バーミキュライト混合層鉱物の底面反射の重複した反射ピークと解釈できる。黒雲母のバーミキュライト化過程において、バーミキュライト層が 4~5 層の黒雲母層毎に出現することが TEM 観察で認められている<sup>4)</sup>。さらに、風化度の進行に伴って、黒雲母中のバーミキュライト層の割合が増加し、 hidroバイオタイト層の増加が認められている<sup>3)</sup>。 hidroバイオタイトの高分解能 TEM 観察によれば、バーミキュライト層は黒雲母結晶中に不規則に形成されるが、局所的には、黒雲母層とバーミキュライト層の 1:1 積層を形成する傾向が認められている。これらの先行 TEM 観察と上記 XRD パターンの観測とは矛盾しない<sup>5)</sup>。

谷津作試料は、万景試料と同様に DB、 hidroバイオタイトのブロードな反射を示した (図 4.2.5)。さらに、1.1nm~1.3nm 領域にブロードな反射を示した。この反射は、 hidroバイオタイトの 002 反射、不規則型黒雲母/バーミキュライト混合層鉱物の底面反射およびバーミキュライトとの共存と判定できる。

以上 4 試料の XRD 同定の結果、その風化度は百目木⇒戸沢⇒万景⇒谷津作の順に進行していると判定できる。これらの風化系列は、DB、不規則型黒雲母/バーミキュライト混合層鉱

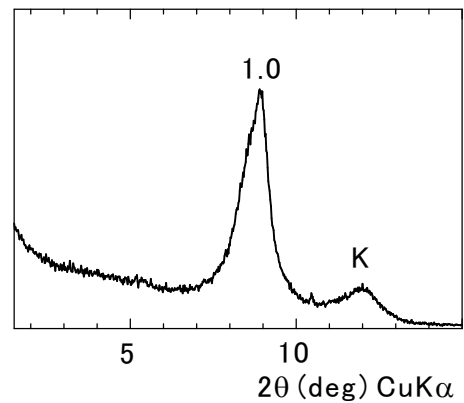


図 4.2.3 戸沢試料の XRD パターン.  
K:カオリナイト

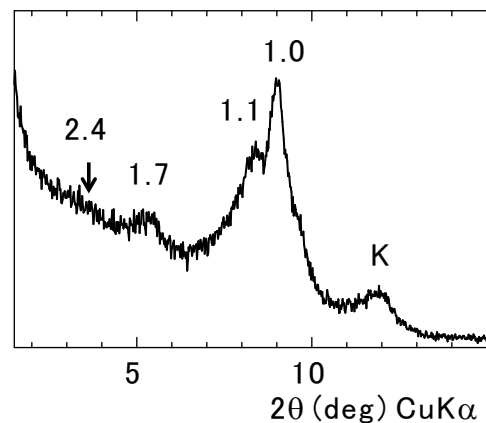


図 4.2.4 万景試料の XRD パターン.  
K:カオリナイト.

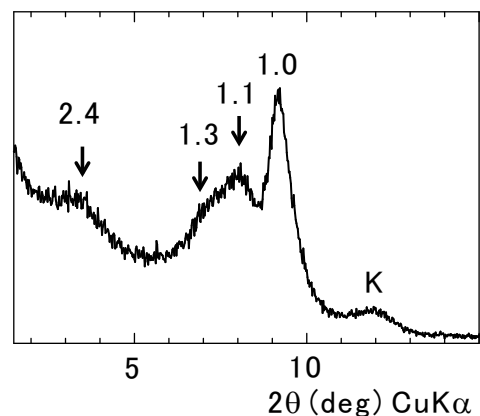


図 4.2.5 谷津作試料の XRD パターン.  
K:カオリナイト.

物、ハイドロバイオタイトおよびバーミキュライトの出現と矛盾しない。

#### ・ Cs 吸着挙動

Cs 吸着率と水溶液中の初期 Cs 濃度との関係を、図 4.2.6～4.2.9 に示した。

百目木試料の初期 Cs 濃度 1～100ppm の Cs 吸着率は、99%と高いが、300ppm 濃度で吸着率は 40%に激減した。より高濃度では 30%程度の値を示した(図 4.2.6)。

戸沢試料の低初期 Cs 濃度領域での挙動は、百目木試料と同様であった。しかし、初期濃度に対する吸着率の低下は、百目木試料の吸着率の低下より緩やかとなった。この吸着率の低下は、XRD 解析による風化度の進行に伴い Cs 吸着サイトが増加し、Cs 吸着率の低下が抑えられたと考えられる(図 4.2.7)。

万景試料の Cs 吸着挙動は、戸沢試料の挙動とほぼ同様である。1～100ppm の低初期 Cs 濃度領域での吸着率は 99%と高く、初期濃度の増加に伴いその吸着率は低下した(図 4.2.8)。但し、万景試料では、300ppm 濃度で吸着率は 90%、600ppm 濃度で吸着率は 60%と高い吸着率を維持している。これらの高吸着率は、XRD 解析で判明した黒雲母/バーミキュライト混合層鉱物の出現との相関が考えられるが、その詳細は今後の検討事項である。

谷津作試料は、今回調べた 4 試料の中で最も風化度の進んだサンプルであり、その Cs 吸着率は 1～1000ppm の領域において最も高い値を示した(図 4.2.9)。この高い吸着率は、DB、ハイドロバイオタイトに加えて、バーミキュライトが風化生成物として含まれたことに起因すると判断できる。

以上、初期 Cs 濃度に対する Cs 吸着率の挙動は、その風化黒雲母の風化度の進行(バーミキュライト化)に大きく依存していることが明らかとなった。

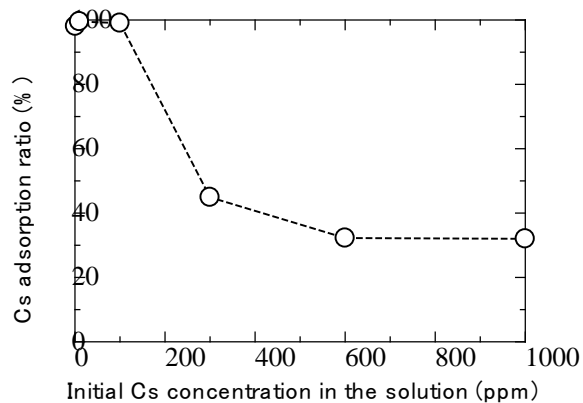


図 4.2.6 百目木試料の Cs 吸着挙動

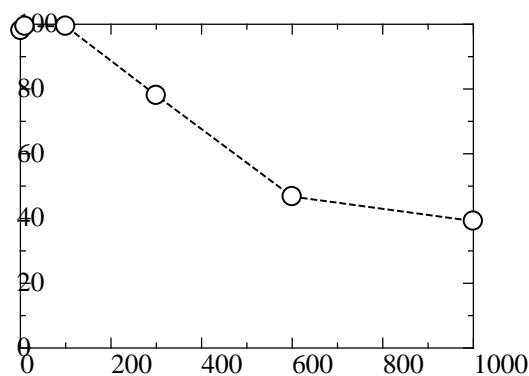


図 4.2.7 戸沢試料の Cs 吸着挙動

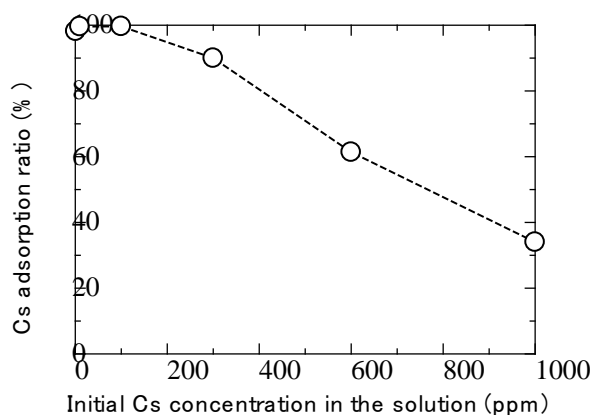


図 4.2.8 万景試料の Cs 吸着挙動

#### 4. 2. 5 実施研究のまとめ

放射性セシウムの粘土鉱物への詳細な吸着メカニズムを解明するために必須である検討すべき「標準物質」の一つとして風化黒雲母について検討した。

変質度・風化度の異なる天然パーミキュライトに関しては、福島県田村郡小野新町周辺にて採集した試料に注目した。その粘土鉱物学的特徴づけがと、その変質度・風化度とCs吸着特性との相関を検討し、その標準試料としての適用の可能性を明らかとした。

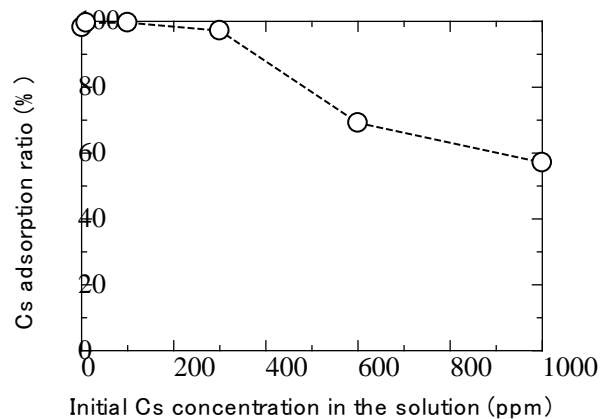


図 4.2.9 谷津作試料のCs吸着挙動

#### 4. 2. 6 今後の課題

先端的分光分析，TEM，SIMS等による検討，さらに吸着脱離検討特にホット試験用サンプルとしての標準試料は必須と考えられる。標準試料の今後の課題としては、化学組成・層電荷・結晶性を精密に制御した合成試料に加えて、福島県田村郡小野新町周辺での天然風化黒雲母に引き続き、報告はあるがその詳細がいまだ不明である福島県石川町・浅川町での探索も進め、標準試料への適用を検討する。一方で、天然試料の特徴づけの技術レファレンスの構築も進める。

#### 4. 2. 7 参考文献

- 1) 長沢敬之助，森嶋光：粘土科学，**30**，101-108 (1990).
- 2) (独) 産業技術総合研究所・地質調査総合センター「地質図 Navi」，<https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php>
- 3) (独) 物質・材料研究機構マテリアルデータベースサイト (MatNavi)，<http://mits.nims.go.jp> (2011).
- 4) J. Banfield and R. Eggleton, Clays Clay Miner., **36**, 47 (1988).
- 5) T. Kogure and T. Murakami, Miner. J., **18**, 131 (1996).

#### 4. 3 変性天然粘土鉱物における Cs 吸着特性脱着挙動の検討

##### 4. 3. 1 研究報告の概要

首都大学東京では、独立行政法人物質・材料研究機構からの再委託を受け、「粘土鉱物・ゼオライトの化学的・バルク状態での吸脱着機構に関する検討」の内、電荷密度の異なる鉱物における Cs 吸着特性脱着挙動に関する基礎研究を実施した。

自然界中で雲母粘土鉱物は風化して層間カチオンが一部水和イオンに交換されている<sup>1)</sup>。この雲母粘土鉱物は水和された層間でセシウムイオンを強く吸着できるが、吸着容量が低いという欠点がある。また、その特異的な吸着メカニズムは詳しくは解明されていない<sup>2)3)4)</sup>。本研究ではこの雲母粘土鉱物に化学処理を施し、人工風化をさせ優れた吸着能を有する吸着剤の作成を目指すとともに、その吸着メカニズムの解明を試みた。本研究では、フロゴパイト、バーミキュライト、バイオタイト、サポナイトなどの粘土鉱物を選択し、その構造と吸着能の相関について検討した。

作成した吸着剤のセシウム吸着能力を評価した結果、粘土鉱物の電荷密度とセシウムイオンの捕捉能に強い相関があることを見出した。特に、フロゴパイト、バーミキュライトにおいて極めて強いセシウムイオン固定化能を見出し、そのメカニズムについて考察を加えた。

##### 4. 3. 2 実施報告の背景・目的

本研究のテーマは放射性物質であるセシウムイオンをより効率的に回収できる吸着剤の開発、及びその吸着メカニズムの解明である。福島第一原発事故で問題になっている様に、水中および土壌からの放射性物質除去は、我々にとって大変重要な課題である。しかしながら水中、土壌にはセシウム以外にも多くのイオンが存在する。さらに汚染水中のセシウムイオン自体の濃度は低いため、セシウムを選択的に回収する事は困難である。また、土壌には雲母粘土鉱物類縁体が存在しており、自然界でのセシウムイオンの最終吸着先となっている<sup>6)</sup>。当研究で得られた試料からセシウムイオンの吸着メカニズムを解明し、セシウムイオンの効率よい吸着、及び、土壌に固定化されたセシウムイオンを取り出す方法の足がかりをつかむ事が目標である。特に、多種の粘土鉱物<sup>7)</sup>を系統的に比較検討することで、セシウムイオンの吸着メカニズム解明を目指した。

##### 4. 3. 3 試験方法

###### カチオン交換による改変粘土鉱物の調製

天然粘土鉱物層間のカリウムイオンを水和性カチオンであるナトリウムイオンに交換した。用いた粘土鉱物は以下の4種である。組成式は XRF, <sup>27</sup>Al MAS NMR より同定した。

- ・ 天然フロゴパイト 1 ( $K_{2.0}(Si_{6.0}Al_{2.0})(Mg_{6.0})O_{20}(OH)_4$ ) カナダ産
- ・ 天然フロゴパイト 2 ( $K_{2.4}(Si_{5.6}Al_{2.4})(Mg_{6.0})O_{20}(OH)_4$ ) スリランカ産
- ・ 天然バーミキュライト ( $Na_{0.90}K_{0.64}[Mg_{2.0}Fe_{2.0}(OH)_8]_{0.2}(Si_{6.26}Al_{1.74})(Mg_{6.0})O_{20}(OH)_4$ ) 三重県産
- ・ 天然バイオタイト ( $K_{2.66}(Si_{5.34}Al_{2.66})(Mg_{2.52}Fe_{3.48})O_{20}(OH)_4$ ) 南アフリカ産

1. 各粘土鉱物をそれぞれ約 5.0 g を水約 50 mL に入れてこまめに攪拌しながら、計 6 時間超音波を当て続けた。
2. 6 時間静置して回収した上澄み液を、孔径 0.1  $\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターでろ過し、ろ物を一晚 100  $^{\circ}\text{C}$  オープンで乾燥させた。
3. 乾燥させて乳鉢で微細化した各粘土 0.5 g に対して、蒸留水 30 mL, NaTPB 1.2 g, NaCl 6.0 g, EDTA $\cdot$ 2Na 1.0 g を加え<sup>8)9)</sup>、ロータミックス (60rpm) を用いて任意の時間攪拌した。
4. 吸引ろ過により試料溶液を除去した後、固体として取り出したテトラフェニルホウ酸カリウム (KTPB) をアセトンで除去した。
5. 4 を数回蒸留水で洗浄し、一晚オープンで乾燥させてから乳鉢で微細化した。その後、XRD, XRF 測定を行った。

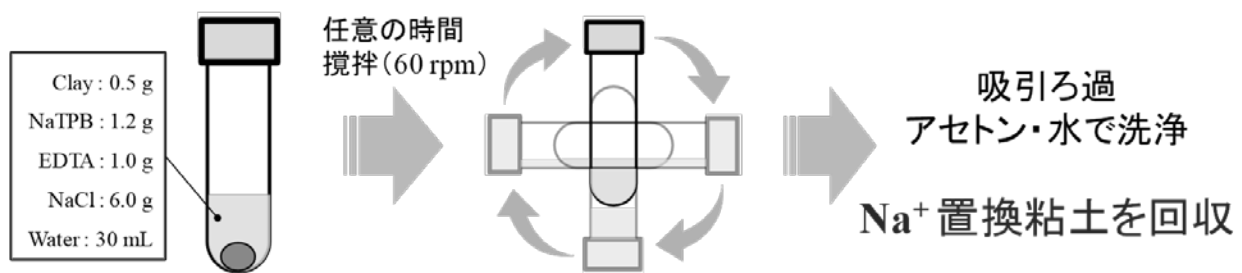


図 1. カチオン交換実験の概略図

## 改変粘土鉱物を用いたセシウムイオン吸着実験

研究を通して行った吸着実験の手順を図 2. に示す。

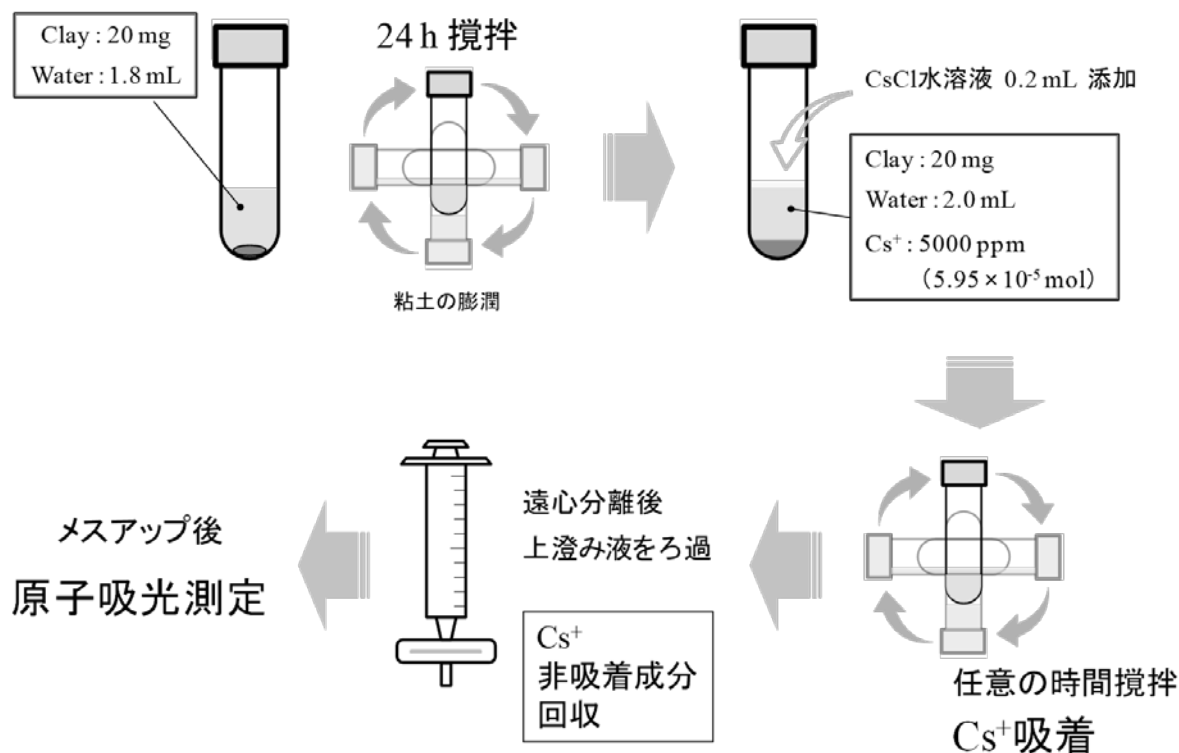


図 2. セシウムイオン吸着実験の概略図

1. 塩化セシウム（関東化学）を用いて、50000ppm 水溶液を調製した。
2. TG 測定により各粘土の含水率を算出して、エッペンドルフ遠沈管に正味 20 mg、蒸留水を 1.8 mL 入れてロータミックス（60rpm）で 24 時間攪拌した。
3. 2 に 1 を 0.2 mL 添加し、ロータミックス（60rpm）で任意の時間攪拌した。
4. 攪拌した各試料を遠心分離機（5000rpm）で 60 分固液分離し、上澄み液を孔径  $0.2 \mu\text{m}$  シリンジフィルターで回収し、原子吸光で測定する濃度域にメスアップした。
5. 測定する濃度域の検量線を塩化セシウム標準液（関東化学 1000ppm）で調製した。
6. 原子吸光分析（SHIMADZU AA-6200, AA-7000）により、各粘土試料のセシウム非吸着成分の濃度測定を行った。
7. 4 で遠心分離機（5000rpm）より固液分離した粘土の XRD 測定を行った。

改変粘土鉱物に吸着したセシウムイオンの脱離実験  
 研究を通して行った抽出実験の手順を図 3. に示す。

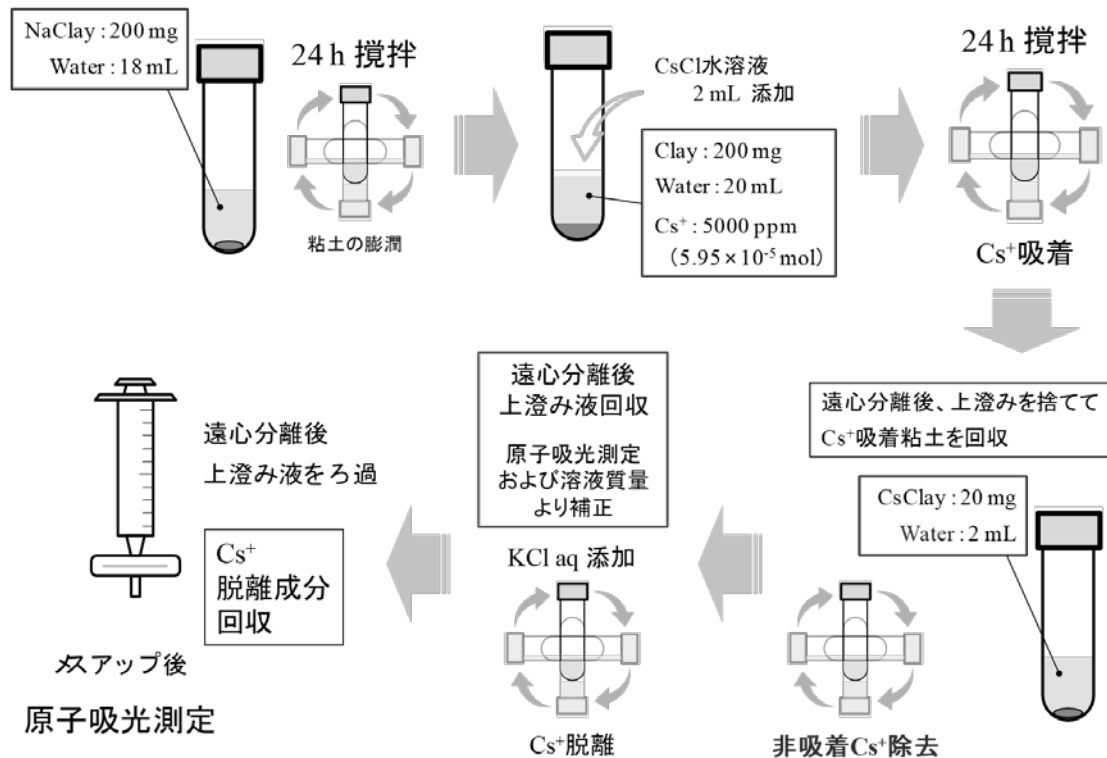


図 3. セシウムイオン脱離実験の概略図

1. 塩化セシウム（関東化学）を用いて、50000ppm 水溶液を調製した。
2. TG 測定により各粘土の含水率を算出して、エッペンドルフ遠沈管に正味 200 mg、蒸留水を 18 mL 入れてロータミックス（60rpm）で 24 時間攪拌した。
3. 2 に 1 を 2 mL 添加し、ロータミックス（60rpm）で 24 時間攪拌した。
4. 攪拌した各試料を遠心分離機（20000rpm）で 180 分固液分離し、上澄み液を捨ててセシウム吸着粘土を回収し、オーブンで乾燥させてから乳鉢で微細化した。
5. セシウム吸着粘土を正味 20 mg、蒸留水を 2 mL 入れてロータミックス（60rpm）で 24 時間攪拌した（膨潤及び洗浄）。
6. 攪拌した各試料を遠心分離機（5000rpm）で 60 分固液分離し、上澄み液を孔径  $0.2\mu\text{m}$  シリンジフィルターで回収し、原子吸光で測定する濃度域にメスアップした。
7. 6 に飽和塩化カリウム水溶液（ $4.56\text{ mol / L}$ ）を 2 mL 添加し、ロータミックス（60rpm）で 24 時間攪拌した。
8. 攪拌した各試料を遠心分離機（5000rpm）で 60 分固液分離し、上澄み液を孔径  $0.2\mu\text{m}$  シリンジフィルターで回収し、原子吸光で測定する濃度域にメスアップした。
9. 測定する濃度域の検量線を塩化セシウム標準液（関東化学 1000ppm）で調製した。
10. 原子吸光分析（SHIMADZU AA-6200, AA-7000）により、6 の洗浄した水中におけるセシウム及び各粘土試料のセシウム脱離成分の濃度測定を行った。

#### 4. 3. 4 実施研究の結果

各粘土鉱物層間のカリウムイオンからナトリウムイオンへのイオン交換率（Na<sup>+</sup>置換率）を XRF 測定により評価した。その結果を図 4 および表 1 に示す。

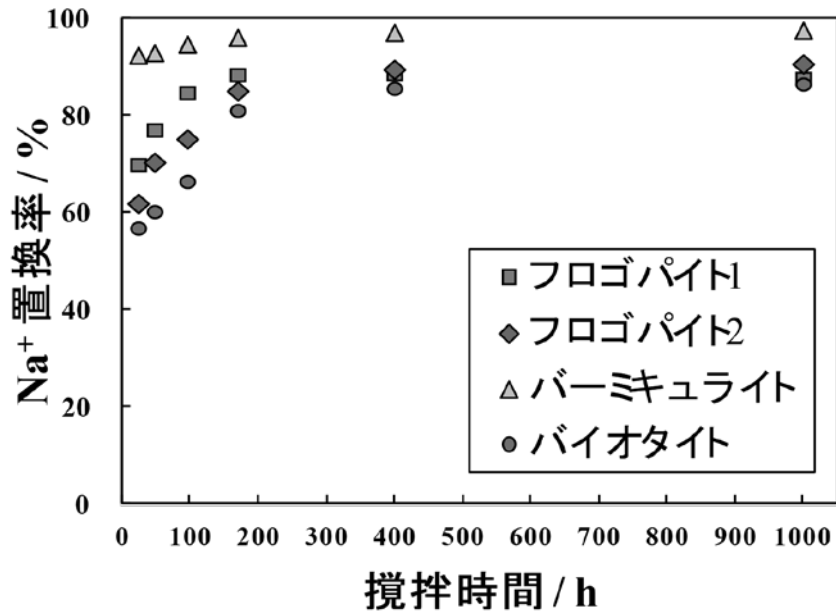


図 4. 攪拌時間と各粘土種 Na<sup>+</sup>置換率の関係

表 1. 攪拌時間と各粘土種 Na<sup>+</sup>置換率の関係

攪拌時間 / h	Na <sup>+</sup> 置換率 / %			
	フロゴパイト1	フロゴパイト2	バーミキュライト	バイオタイト
24	70.0	62.0	92.5	56.9
48	77.1	70.5	93.0	60.3
96	84.8	75.3	94.8	66.5
170	88.5	85.2	96.2	81.5
400	88.7	89.6	97.2	85.7
1000	87.7	90.7	97.6	86.6

図 4 および表 1 から粘土種によって K<sup>+</sup>から Na<sup>+</sup>への置換の起こりやすさが異なっている事が分かる。Cs<sup>+</sup>が K<sup>+</sup>とほぼイオン半径が等しく、また水和しにくいなどの性質が似ている事から<sup>7)</sup>、Na<sup>+</sup>置換の起こりやすさを吸着した Cs<sup>+</sup>の脱離しやすさとして捉える事もできると考えられる。

一方、攪拌 1000 時間で各粘土ともにほぼ平衡に達している事が確認され、最終的に Na<sup>+</sup>置換率 約 90% を達成する事ができた。

また、層間の  $K^+$  が  $Na^+$  に置換された事による粘土層間距離の変化や、湿潤・乾燥状態の違いによって層間距離が変化するかを XRD 測定に確認した結果を図 5 に示す。

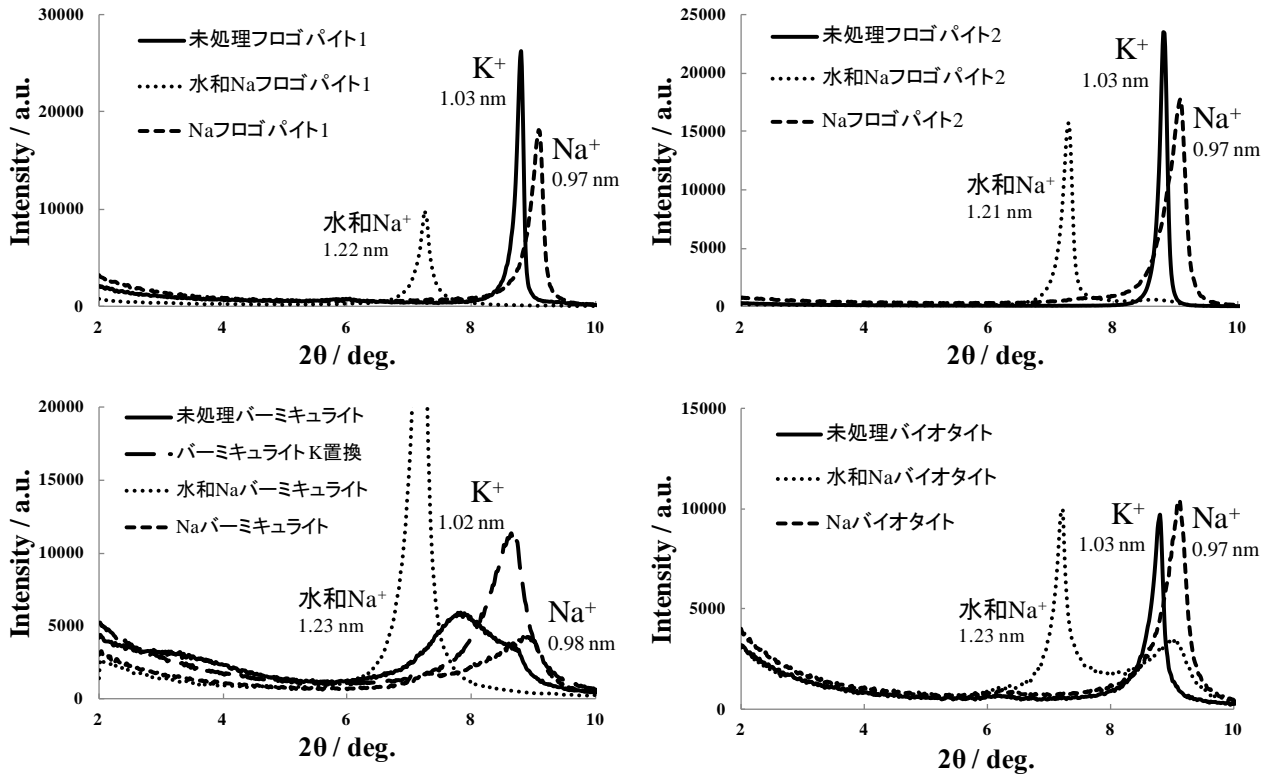


図 5. 各粘土種の  $Na^+$  置換前後における低角側粉末 X 線解析結果

未処理バーミキュライトのピークは図 5 左下を見ると分かるように、未処理の時点で組成中に  $Na^+$  が多く含まれているため、 $Na^+$  と  $K^+$  のピークが出てブロード化していた。そこで確認のため、飽和塩化カリウム水溶液に添加して攪拌し  $K^+$  に置換した粘土の XRD 測定結果も記載しておいた。それを考慮すると、各未処理粘土はともに  $K^+$  のピーク (約 1.03 nm) が強く出ている事が分かる。そして、 $Na^+$  置換操作によって  $K^+$  ピークが消失し、 $Na^+$  のピーク (約 0.97 nm および 1.22 nm) が確認された。 $Na^+$  ピークが二種類存在する理由は、粘土試料がそれぞれ高温乾燥 (約 100°C) 状態、大気下保存状態で XRD 測定した事によるもので、層間距離が柔軟に変化している事を示唆している。

なお、 $Na^+$  ピークは湿潤状態では約 1.48 nm までシフトするが、一方で未処理粘土 ( $K^+$ ) は乾燥・湿潤状態でピーク位置に変化がない。これらの事から、層間の交換性陽イオンを水和しやすい  $Na^+$  とした事で、水中で層間が拡がり  $Cs^+$  が容易に層間内部へ侵入できる状態へ改変できたと考察される。

次に、セシウムイオン吸着実験により、Cs<sup>+</sup>が吸着した各 Na<sup>+</sup>置換粘土の粘土層間距離の変化を XRD 測定により確認した (図 6)。

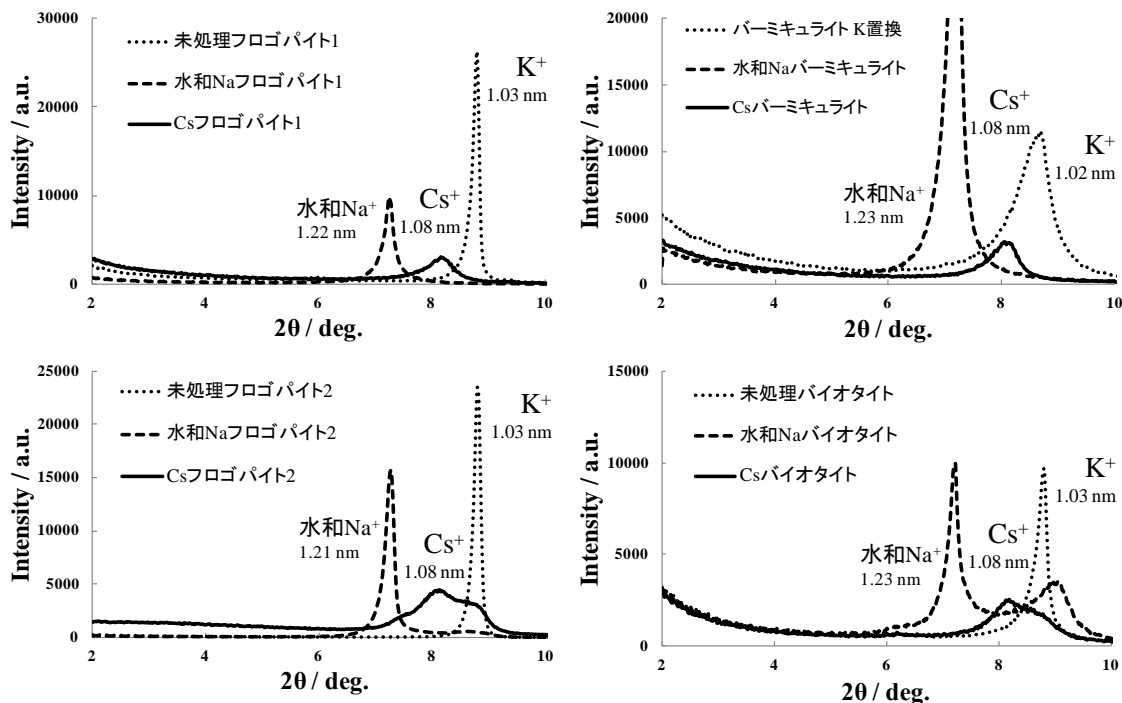


図 6. 各粘土種の未処理、Na<sup>+</sup>置換及び Cs<sup>+</sup>吸着状態における低角側粉末 X 線解析結果

Cs<sup>+</sup>が吸着すると層間が開いている事が分かり、K<sup>+</sup>同様に酸素六員環からなる空孔に挟まれている事が確認された。例として Cs<sup>+</sup>吸着した合成サポナイト、フロゴパイト 1 及びフロゴパイト 2 の XRD 測定結果の比較を図 7 に示した。高い Cs<sup>+</sup>吸着率を示したフロゴパイト 1、バーミキュライトは、Cs<sup>+</sup>のピークのみが鋭く出ている事が分かる。一方、合成サポナイトはほぼ Na<sup>+</sup>ピークであり、Cs<sup>+</sup>吸着後も層間が開じていない事が確認できる。また、フロゴパイト 2 やバイオタイトは Cs<sup>+</sup>ピークが確認でき、Cs<sup>+</sup>が吸着して層間が開じている事が分かるが、右肩に他の陽イオンによるピークが存在している。ピーク位置的に K<sup>+</sup>のように見えるが、湿潤状態にするとピーク位置が変化して Na<sup>+</sup>によるものである事が確認された (図 7 点線)。

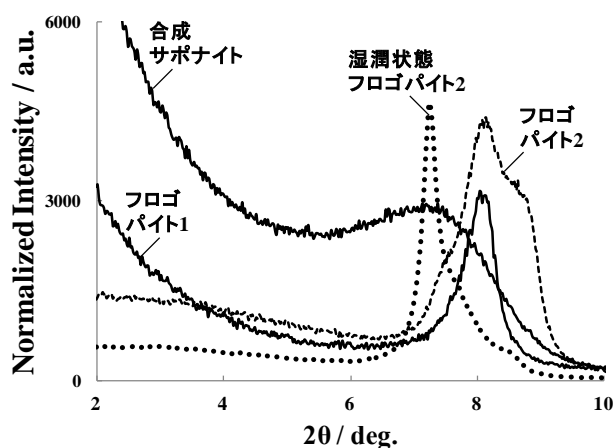


図 7. Cs<sup>+</sup>が吸着した各粘土の低角側 XRD 結果

これらの結果から、合成サポナイトは他の Na<sup>+</sup>置換粘土とは異なり層間が開じていない事、またフロゴパイト 2 やバイオタイトは、層間が開じて Cs<sup>+</sup>が吸着するものの、Na<sup>+</sup>が比較的多く残存しており、湿潤状態時に Cs<sup>+</sup>ピークが弱くなっている事から、層間に Cs<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>が混在して吸着している可能性が高いと考えられるが、Na<sup>+</sup>が吸着する層と Cs<sup>+</sup>が吸着する層が共存している可能性も否定し

きれない。

また、ナトリウムイオンに交換した各粘土 ( $\text{Na}^+$ 置換粘土) および合成サポナイトであるスメクトン SA (クニミネ:  $\text{Na}_{0.49}\text{Mg}_{0.14}(\text{Si}_{7.2}\text{Al}_{0.8})(\text{Mg}_{5.97}\text{Al}_{0.03})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ ) と未処理の各粘土を用いて行ったセシウムイオン吸着実験の結果を示す。図 8 は攪拌時間と  $\text{Cs}^+$ 吸着率の関係である。

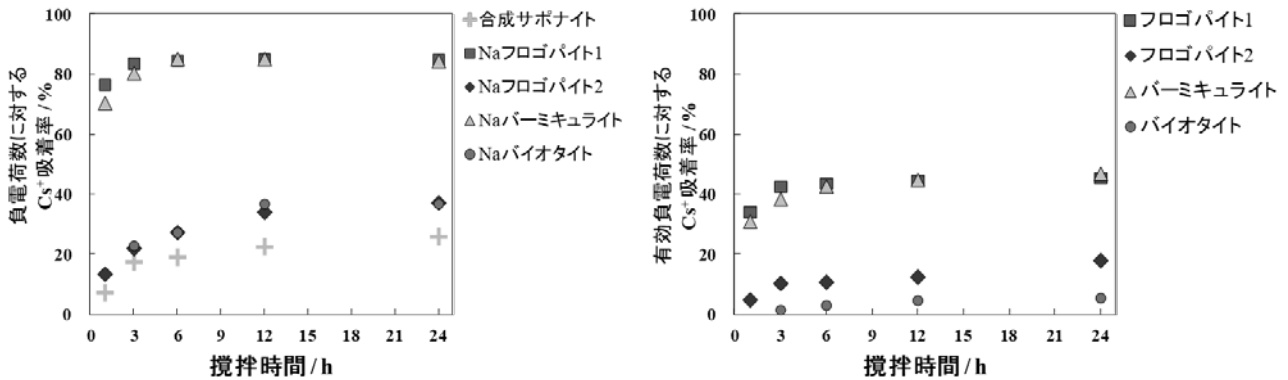


図 8. 攪拌時間と  $\text{Cs}^+$ 吸着率の関係 (左図:各  $\text{Na}^+$ 置換粘土および合成サポナイト 右図:各未処理粘土)

図 8 左図から、各  $\text{Na}^+$ 置換粘土ともに攪拌 24 時間で、 $\text{Cs}^+$ 吸着量がほぼ飽和している事が確認された(フロゴバイト 2, バイオタイトは攪拌 48 時間より、飽和状態である事を確認)。図 8 左右を比較すると分かるように、粘土層間の交換性陽イオンを  $\text{K}^+$ から  $\text{Na}^+$ に置換した事で、各粘土種共に  $\text{Cs}^+$ 吸着量が大幅に増加した。この結果は、人工風化した粘土鉱物が優れた  $\text{Cs}^+$ 吸着材となり得る事を示唆している。なお、SSA は攪拌 24 時間の時点で飽和吸着に達しておらず、ラングミュア吸着等温式より飽和吸着量を算出した結果、 $\text{Cs}^+$ 吸着率は 51.7%と導出された (図 9)。よって、 $\text{Cs}^+$ 吸着率が 51.2%となった攪拌 168 時間の時点で合成サポナイトも飽和吸着しているとして考察を進めた (図 11)。

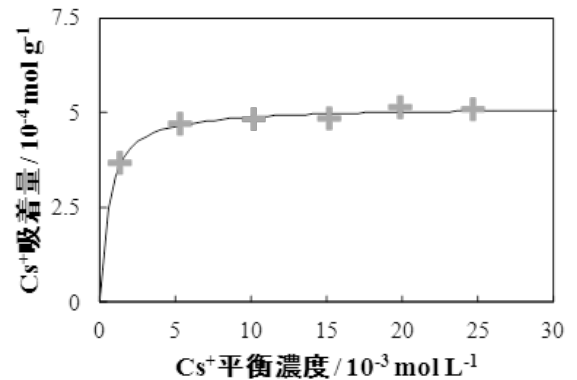


図 9. 合成サポナイトの  $\text{Cs}^+$ 吸着等温式 (仕込み粘土量  $2.0 \times 10^{-2} \text{ g}$ , 仕込み  $\text{Cs}^+$ 濃度  $0.5 \sim 3.0 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$ )

一方、興味深い事に  $\text{Na}^+$ 置換したにも関わらず  $\text{Cs}^+$ 吸着率に違いが生じた。負電荷数が多すぎても  $\text{Cs}^+$ が吸着しない事から、 $\text{Cs}^+$ をより強固に吸着する吸着サイトの形成されやすさが粘土の種類で異なっていると考えられる。なお、層間が膨潤している場合も、粘土表面上では  $\text{Cs}^+$ の方が水和  $\text{Na}^+$ よりも吸着力が強いと推測された。しかし、水中で明らかに層間が膨潤している合成サポナイトの  $\text{Cs}^+$ 吸着率は 51.7%と比較的低かった。この事から、層間が膨潤している系では  $\text{Na}^+$ に比べて  $\text{Cs}^+$ の吸着力が圧倒的に強いという訳ではないと考察され、土壤中における粘土鉱物の特異な  $\text{Cs}^+$ 吸着挙動に対して、層間が閉じた際に上下の酸素六員環より生じる吸着サイトが強く影響していると考えら

れる。

粘土表面上での吸着とは異なり、吸着サイトの形成に結びつく層間が閉じた系では、酸素六員環からなる空孔によって立体的に制限されるはずである。そこで、各粘土種における空孔数に対する負電荷数の比と Cs<sup>+</sup>吸着率の関係性を検討した。フロゴパイト 1 を例に挙げると、フロゴパイト 1 の単位格子の組成式は K<sub>2.0</sub>(Si<sub>6.0</sub>Al<sub>2.0</sub>)(Mg<sub>6.0</sub>)O<sub>20</sub>(OH)<sub>4</sub> であり、Na<sup>+</sup>置換フロゴパイト 1 の八面体中心より上半分の組成式は、Na<sub>0.88</sub>K<sub>0.12</sub>(Si<sub>3.0</sub>Al<sub>1.0</sub>)(Mg<sub>3.0</sub>)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> となる。この時、酸素六員環からなる空孔数は 2 個であり (図 10. 左)、負電荷数は 1 個と近似できる<sup>\*</sup>。よって、フロゴパイト 1 における空孔数と負電荷数の比は 2 : 1 である事が分かり、粘土表面上における Cs<sup>+</sup>吸着模式図は図 10 右のようになる。

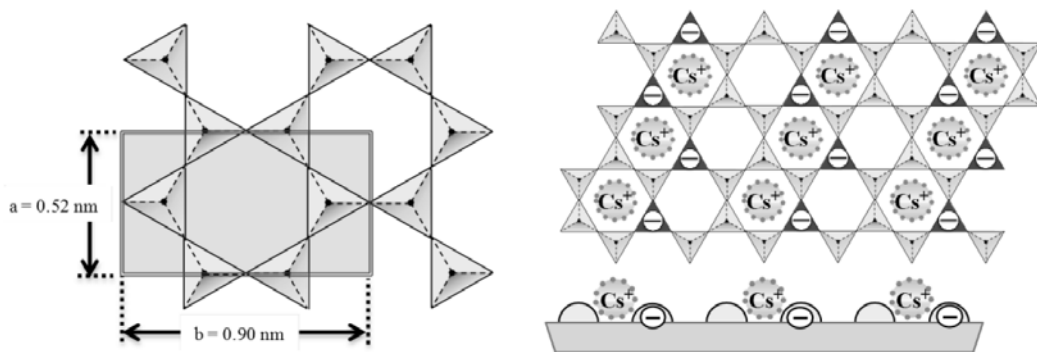


図 10. 左：粘土鉱物単位格子中の空孔 右：フロゴパイト 1 表面上の Cs<sup>+</sup>吸着模式図

※ Na<sup>+</sup>に置換された空孔および負電荷を有効と (残存する K<sup>+</sup>を考慮) するならば、空孔数は 1.88 個、負電荷数は 0.88 個と計算され、空孔数と負電荷数の比は約 2.1 : 1 となる。よって、空孔数に対する負電荷数の比に殆ど違いがない事が分かる。しかし、この算出法では Na<sup>+</sup>置換率を人為的に変化させる事で比率を変える事が可能である。従って、各粘土種共に Na<sup>+</sup>置換率が約 90%に達している事を考慮して、組成式より算出される空孔数及び負電荷数を用いて評価・検討を行った。

同様の手順で算出した各粘土種の空孔数に対する負電荷数の比を横軸、Cs<sup>+</sup>吸着率を縦軸にとると、図 11 のようになる。Cs<sup>+</sup>をより強固に吸着する吸着サイトの形成されやすさが粘土の種類で異なっているとすれば、図 11 は粘土鉱物の構造や組成に由来する負電荷と層間が閉じて形成される Cs<sup>+</sup>吸着サイトの関係性を示唆する重要な結果であると考察される。

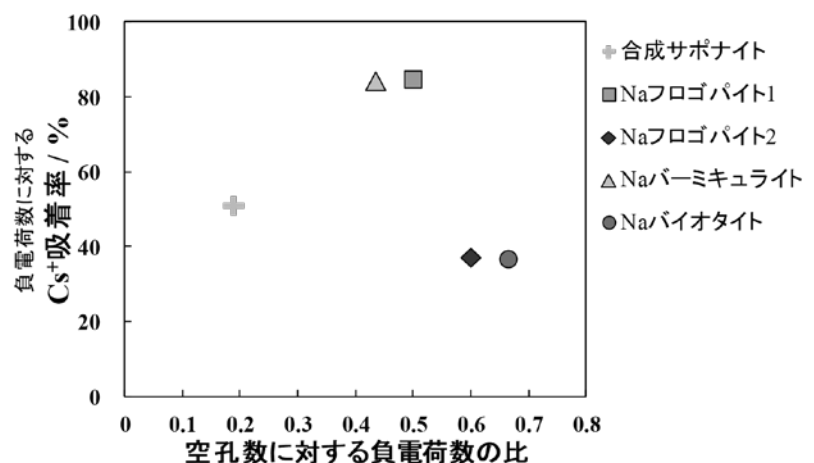


図 11. 各粘土種の有効空孔数に対する有効負電荷数比と Cs<sup>+</sup>吸着率の関係

高いCs<sup>+</sup>吸着率を示したフロゴパイト1, バーミキュライトでは、Cs<sup>+</sup>が上下の負電荷を引き寄せた際、図12.のように対面する上下の空孔より形成される吸着サイト数と負電荷数の比が約1:1となるため無理なく収まる事が分かる。そして、層間がしっかりと閉じる事で上下負電荷との静電相互作用が強く働くため、Cs<sup>+</sup>は強く固定化されると考えられる。



図12. 空孔数と負電荷数のバランスによる層間吸着サイト形成とCs<sup>+</sup>吸着挙動の模式図

合成サポナイトは空孔数に対して負電荷発生点が少ないため、Cs<sup>+</sup>は上下の負電荷を引き寄せて層間を閉じる事が難しい。よって、Cs<sup>+</sup>は粘土表面上のNa<sup>+</sup>との競争吸着平衡に従うと考察される。

一方、フロゴパイト2, バイオタイト空孔数に対して負電荷数が多いためCs<sup>+</sup>は上下の負電荷を引き寄せると考えられるが、全てのCs<sup>+</sup>は対面する上下の空孔より形成される吸着サイトに収まる事ができない。よって、層間を閉じるためには上下の空孔がずれる必要があると考察されるが(図11.)、図5, 6.で示した通り、フロゴパイト1, バーミキュライトと同様約1.08 nmであることを考慮すると、図11の吸着状態は考えにくい。ここで改めて図6.を見ると、フロゴパイト2の1.03 nm付近ピークはNa<sup>+</sup>によるものであり、乾燥状態ではNa<sup>+</sup>は水和していない事が分かる。すなわち、Cs<sup>+</sup>のみで負電荷を補うように吸着すると層間を閉じる事はできないが、イオン直径がCs<sup>+</sup>(0.34 nm)より小さいNa<sup>+</sup>(0.19 nm)の存在を考慮すれば、負電荷をある程度補った上で層間を閉じる事ができると考えられる(組成式上の層負電荷を層間陽イオンが全て補っている確証はない)。そして、乾燥状態では層間が閉じているが、水中ではNa<sup>+</sup>が水和して層間が広がってしまうため、Cs<sup>+</sup>吸着率が比較的低いと考察される。

以上より、水中においてフロゴパイト2, バイオタイト及び合成サポナイトは層間が広がってしまうが、フロゴパイト1, バーミキュライトは層間がしっかりと閉じてCs<sup>+</sup>が強く固定化されているため、図11のようにCs<sup>+</sup>吸着率が大きく異なると考えられる。

#### 4.3.5 実施研究のまとめ

実験結果から以下のことが判明した

1. 様々な粘土鉱物において、ナトリウムイオンに交換した場所はセシウムイオンに対して有効な吸着点となる。
2. 吸着したセシウムイオンは、カリウムイオンと同じように粘土シート上に酸素原子からなるヘキサゴナルポケットに収まる事で層間を閉じて吸着する。
3. 粘土鉱物の種類によって層間の閉じやすさが異なり、セシウムイオンの吸着量や吸着力が粘土鉱物の構造や組成に由来する負電荷に支配されている事が示唆された。

#### 4. 3. 6 今後の課題

電荷密度の異なる様々な粘土鉱物の Na<sup>+</sup>置換を行い、各改変粘土鉱物の Cs<sup>+</sup>吸着率と構造上の性質の違いとの関係性を評価した結果、Fig.5.1 に示す Cs<sup>+</sup>吸着率と空孔数に対する負電荷数の比との関係性から、粘土構造に由来する Cs<sup>+</sup>特異的吸着挙動の足がかりを得る事ができたといえる。しかし、本実験に用いた粘土鉱物試料は殆どが天然物のため組成が安定しない、また狙った領域にくると予想される粘土鉱物を実際に用いるために探索するのは困難といったいくつかの欠点がある。

一方、水熱合成法を用いる事で平均負電荷間距離の異なるサポナイトを合成する事が可能であり。合成サポナイトは原料仕込み比を変化させる事で想定した組成を持つサポナイトを合成できるため、Cs<sup>+</sup>吸着率と空孔数に対する負電荷数の比との関係性をより定量的に評価できる可能性がある。図 14 の Sap 0.8 は水熱合成法によって作製し、XRD, XRF, FT-IR, TG-DTA で同定したサポナイトを用いて、Cs<sup>+</sup>吸着実験を行った結果である。見てわかる通り、Sap 0.8 も Cs<sup>+</sup>吸着率と空孔数に対する負電荷数の比との関係に従っている事が分かる。そこで、今後は図 14 の合成可能な領域にあたるサポナイトを合成し、Cs<sup>+</sup>吸着率を評価・検討する事でより詳細な粘土鉱物における Cs<sup>+</sup>特異的吸着挙動の解明を目指していきたい。

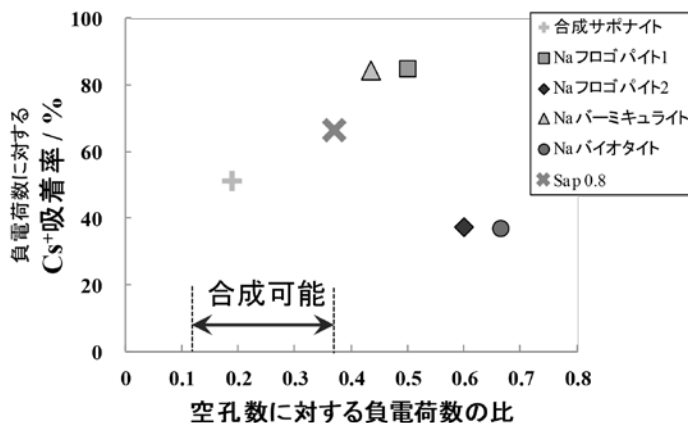


図 14. 各粘土種および水熱合成サポナイトの有効空孔数に対する有効負電荷数比と Cs<sup>+</sup>吸着率の関係

#### 4. 3. 7 参考文献

- 1) 井上厚行, 清水糸子, 湊秀雄 (1981) フロゴバイトの変質機構と反応経路, 鉱物学雑誌, 15, 66-84.
- 2) W. J. Paulus, S. Komarneni, R. Roy. (1992) Bulk synthesis and selective exchange of strontium ions in Na<sub>4</sub>Mg<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>Si<sub>40</sub>20F<sub>4</sub> mica, Nature, 357, 571-573.
- 3) Sawhney, B, L. Clay and Clay Minerals, 1970, 18, 47-52.
- 4) Nakao, A.; Thiry, Y.; Funakawa, S.; Kosaki, T. Soil Science and Plant Nutrition, 2008, 54, 479 - 489.
- 5) 物質材料研究所 (NIMS), 吸着データベース
- 6) James P McKinley et al. (2001) Distribution and Retention of Cs in Sediments at the Hanford Site, Washington. Environmental Science and Technology 35, 3433-3441
- 7) 日本粘土学会編 粘土ハンドブック第三版 技報堂出版
- 8) Reed, M. G., and Scott, A. D. Proc. Soil Sci. Amer. 1962 26, 41-5.
- 9) Scott, A. D. and Smith, S. J. Clays and Clay Minerals, 1966 14, 69-81

#### 4. 4 ゼオライト系鉱物中の Cs および Sr の脱着・不溶出化・長期安定性に関する検討

##### 4. 4. 1 研究報告の概要

金沢工業大学では、「粘土鉱物に対する放射性物質への吸脱着機構解明と減容法の開発」の内、ゼオライト系吸着材の Cs<sup>+</sup>, Sr<sup>2+</sup>等の吸着、焼却による減容化法および長期安定化法に関する基礎研究を継続して実施している。本年度は、Cs<sup>+</sup>吸着天然ゼオライト（クリノプチロライト(CLI), モルデナイト(MOR)）、石炭飛灰のアルカリ水熱処理によるゼオライト転換を利用した Cs<sup>+</sup>安定化に関する検討、ゼオライト／アパタイト(HA)複合体による Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の吸着及び焼成による安定化、Cs<sup>+</sup>吸着 MOR／HA 複合焼結体の作製とその溶液安定性に関する評価を行った。

本研究により天然ゼオライト及び石炭飛灰からアルカリ水熱処理して得られたアナルサイム系ゼオライトが水熱処理過程での Cs<sup>+</sup>保持能が高く、高い溶液安定性を示すことが明らかになった。Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収・安定化研究では、天然 CLI に HA を形成した天然 CLI／HA 複合体を用いることで Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収が可能なことが明らかになった。また 1100℃以上の焼成により、長石や石英などに相変化（安定鉱物化）し、水溶液中への溶出を抑制できることが明らかになった。Cs<sup>+</sup>の長期安定化に関する研究では常圧で焼結した Cs<sup>+</sup>吸着 MOR／HA 複合焼結体が、セメント固化（簡易セメントで作製）したものと比較して高い溶液安定性を示すことが明らかになった。

以上の結果はゼオライトによる放射性 Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収と長期安定化に関する基礎データとして利用が期待できる。

##### 4. 4. 2 実施報告の背景・目的

放射性物質の中でも長い半減期を持つ放射性セシウム(Cs-137半減期30年)と放射性ストロンチウム(Sr-90半減期29年)は、長期間環境に影響を与えるため、効率良く回収すると共にその後の長期安定化も考慮した回収材の開発が求められる。また汚染水処理システムの配管や貯水タンク等からの汚染水漏れも起こっており、広範囲に使用できる大量の回収材が必要である。放射性セシウムの処理には分離性能が高いゼオライト、チタンケイ酸塩、フェロシアン化物等を用いた処理システムが採用されている<sup>1)</sup>。中でもゼオライトは高い耐放射線性を持ち、国内で豊富に産出され、粒状物質としてカラム吸着分離に使用できることから現場で大量に使用するには大変優れている。また Cs<sup>+</sup>吸着後は高温焼成により安定鉱物化できるため長期安定化材としても適している。

汚染水中の放射性 Cs<sup>+</sup>や Sr<sup>2+</sup>は、ゼオライト細孔中の Na<sup>+</sup>などの陽イオンとイオン交換することにより主に回収される（式1）。



植物浸出水中の放射性 Cs<sup>+</sup>の回収にも用いられている<sup>2)</sup>。日本で豊富に産出される天然ゼオライト種である MOR や CLI は、Cs<sup>+</sup>直径(約 0.34 nm)に近い細孔径を有しており、Cs<sup>+</sup>選択性が極めて高い。一方、合成ゼオライト種であるゼオライト A は Sr<sup>2+</sup>直径(約 0.24 nm)に近い細孔径を有しており、Sr<sup>2+</sup>選択性が極めて高い。これらの結果は平成 23 年度科学技術戦略推進費「農地土壌等における放射性物質除去技術の開発」プロジェクト内で金沢工業大学が実施した各種ゼオライトの Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>吸着データから明らかにされている<sup>3,4)</sup>。またこれらの吸着データは他プロジェクト内でも行われており<sup>5)</sup>、

ゼオライトの  $\text{Cs}^+$  と  $\text{Sr}^{2+}$  に対する基礎吸着データはすでに構築済みである。しかし、放射性  $\text{Cs}^+$  と  $\text{Sr}^{2+}$  で汚染された地域の復興には、汚染水中の放射性  $\text{Cs}^+$  と  $\text{Sr}^{2+}$  をより選択性の高いゼオライト系吸着材により効率的に除染すると同時に、除染で発生するゼオライト廃棄物の減容化や長期安定化が必要となる。

$\text{Cs}^+$  選択性に関しては上記で述べたように MOR 系, CLI 系ゼオライトが高いことが明らかになっている。しかし  $\text{Cs}^+$  吸着後のこれらのゼオライトは、海水など高濃度の陽イオン種 ( $\text{Na}^+$  等) と接触すれば、 $\text{Cs}^+$  が徐々に放出する。そのため、更なる安定化法が求められている。ゼオライト中の  $\text{Cs}^+$  や  $\text{Sr}^{2+}$  の安定化法に関しては焼成による安定鉱物化が報告されている<sup>6)</sup>。しかし、セメント固化やアパタイト固化などによる更なる安定性向上（長期安定化）に関する検討報告は少ない。一方、汚染水処理システムの配管や貯水タンク等から漏出した汚染水に関しては、放射性  $\text{Cs}^+$  だけでなく放射性  $\text{Sr}^{2+}$  も多く含有されているため、同時に効率良く回収できる材料も必要である。 $\text{Sr}^{2+}$  の吸着材としてはゼオライト A の他に、HA も知られている。HA は合成が容易で、微結晶であれば、構造中の  $\text{Ca}^{2+}$  との交換により、 $\text{Sr}^{2+}$  を回収することができる。また緻密体では極低溶解性を示すため、長期安定性が見込まれる。

これまで、本プロジェクトではカチオン種の異なる MOR とゼオライト A を用いた  $\text{Cs}^+$  及び  $\text{Sr}^{2+}$  吸着に関する検討や焼成による減容化法および長期安定化法に関する基礎研究を実施してきた。一昨年度は焼成したカチオン種の異なる天然および合成 MOR からの  $\text{Cs}^+$  の溶出挙動を純水及び 0.6 M NaCl 中で 24 時間の反応条件で調べ、 $\text{Cs}^+$  の脱着や不溶出化に適したカチオン種や焼成温度の検討を行った<sup>7,8)</sup>。昨年度は  $\text{Cs}^+$  選択性の高い MOR の吸着特性を詳細に把握するため、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  モル比の異なる MOR の  $\text{Cs}^+$  吸着挙動の検討を行った。また 800°C ~ 1200°C で熱処理した  $\text{NH}_4^+$  型合成 MOR からの  $\text{Cs}^+$  溶出挙動に関して反応時間をパラメータとして評価し、脱着と不溶出化に関する検討を行った。さらに放射性  $\text{Sr}^{2+}$  に対して高い選択性を有する合成ゼオライト A に着目し、ゼオライト A 中のカチオン種の違いが  $\text{Sr}^{2+}$  溶出に与える影響と熱処理したカチオン種の異なるゼオライト A からの  $\text{Sr}^{2+}$  溶出挙動を評価した<sup>9,10)</sup>。

本年度は  $\text{Cs}^+$  及び  $\text{Sr}^{2+}$  の長期安定化方法の更なる検討と  $\text{Cs}^+$  及び  $\text{Sr}^{2+}$  の効率回収を目指し、 $\text{Cs}^+$  吸着天然ゼオライト (CLI, MOR) 及び石炭飛灰のアルカリ水熱処理によるゼオライト転換を利用した  $\text{Cs}^+$  安定化に関する検討、CLI/HA 複合体による  $\text{Cs}^+$  と  $\text{Sr}^{2+}$  の効率回収と焼成による安定化、 $\text{Cs}^+$  吸着天然 MOR/HA 複合焼結体の作製とその溶液安定性の評価を行った。

#### 4. 4. 3 試験方法

##### ・試料について

##### $\text{Cs}^+$ 吸着材：モルデナイト (MOR)

図 4.3.1 に MOR の骨格構造を示す。MOR は c 軸方向に長く伸びた 2 つの細孔 (細孔径: 0.67×0.70 nm, 0.29×0.57 nm) を持ち、その細孔径が  $\text{Cs}^+$  直径 (0.34 nm) に近いので  $\text{Cs}^+$  に対して高い選択性を有する。特に 8 員環の小さい細孔は、 $\text{Cs}^+$  直径に近いので最適と

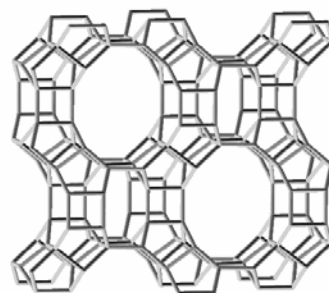


図 4.3.1 モルデナイトの骨格構造 細孔径: 0.67×0.70 nm, 0.29×0.57 nm

考えられている。本研究では Cs<sup>+</sup> 選択性が高い天然 MOR 粉末を固化試験とアルカリ水熱処理によるゼオライト転換試験に用いた。

#### Cs<sup>+</sup>吸着材：クリノプチロライト(CLI)

図 4.3.2 に CLI の骨格構造を示す。CLI も MOR 同様 *c* 軸方向に長く伸びた 2 つの細孔(細孔径: 0.44×0.72 nm, 0.40×0.55 nm)を持ち, MOR 同様に細孔径が Cs<sup>+</sup>直径(0.34 nm)に近い為 Cs<sup>+</sup>に対して高い選択性を有する。本研究では天然 CLI (福島県西会津産)を HA との複合化試験と Cs<sup>+</sup>及び Sr<sup>2+</sup>の効率回収試験, 及び焼成安定化, アルカリ水熱処理によるゼオライト転換試験に用いた。

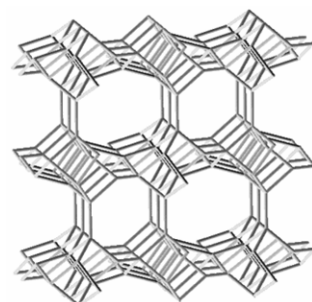


図 4.3.2 クリノプチロライトの骨格構造 細孔径: 0.44×0.72 nm, 0.40×0.55 nm

#### Sr<sup>2+</sup>吸着材, 長期安定化材:水酸アパタイト(HA)

図 4.3.3 に HA(Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>)の構造を示す。HA は, 合成が容易で, 微結晶であれば, 構造中の Ca<sup>2+</sup> との交換により, Sr<sup>2+</sup> を回収することができる。また易焼結性を有し, 緻密体では極低溶解性を示すため, 放射性物質の長期安定化材として期待できる。本研究では Sr<sup>2+</sup>吸着能の向上を目指し, 天然 CLI 表面への HA の合成を, 固化体作製に用いる緻密化しやすい球状 HA の合成を湿式法及び噴霧乾燥法を用いて行った。

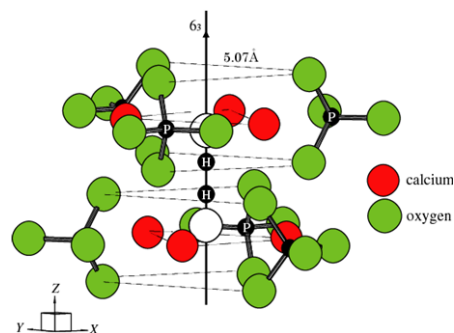


図 4.3.3 水酸アパタイトの構造

・Cs<sup>+</sup>吸着天然ゼオライトのアルカリ水熱処理と得られた生成物の溶出挙動

-Cs<sup>+</sup>吸着天然ゼオライトの作製-

天然ゼオライトとして, 60 μm 以下まで粉碎した福島県西会津産天然 CLI と宮城県愛子産天然 MOR を使用した。Cs<sup>+</sup>吸着試験は天然ゼオライト 10.0 g と塩化セシウム(CsCl)水溶液 150 mL を横揺れ振とう器(80 rpm)を用いて 24 時間接触させることにより行った。CsCl 溶液中の Cs<sup>+</sup>濃度は, 100 mg/L, 1000 mg/L, 10000 mg/L とした。接触後, 0.45 μm のメンブレンフィルターで固液分離し, 液相中の Cs<sup>+</sup>濃度は原子吸光光度計(AAS)を用いて定量した。また固相は, 洗浄後に乾燥器を用いて 80℃で乾燥させた。Cs<sup>+</sup>吸着率は以下の式(2)から算出した。

$$\text{吸着率 (\%)} = (C_0 - C) / C_0 \times 100 \quad \dots (2)$$

(C<sub>0</sub> = 初期濃度, C = 平衡濃度)

-アルカリ水熱処理-

Cs<sup>+</sup>吸着天然CLI及び天然MOR2.0 gと1~3 Mの水酸化ナトリウム(NaOH)水溶液 30 mL を耐熱容器に入れ, 100℃~200℃で24時間反応させた。反応後, 0.45 μmのメンブレンフィルターで固液分離し, 液相中のCs<sup>+</sup>濃度をAASにより定量した。また固相評価は粉末X線回折装置(XRD), 走査型電子顕微鏡(SEM), 集束イオンビーム加工装置(FIB), 透過型電子顕微鏡(TEM), 及びエネルギー分散型X線分析装置(EDX)を用いて行った。

#### -Cs<sup>+</sup>溶出試験-

アルカリ水熱処理後の生成物 0.3 g と 0.6 M 塩化ナトリウム(NaCl)水溶液 30 mL を横揺れ振とう器(80rpm)で 24 時間接触させた。接触後、0.45 μm のメンブレンフィルターで固液分離し、液相中の Cs<sup>+</sup>濃度を AAS により定量した。

#### ・天然CLI/HA複合体によるCs<sup>+</sup>とSr<sup>2+</sup>の吸着・安定化試験

##### -天然 CLI/HA 複合体の作製-

試料として粒子径 5~10 mm の西会津産天然 CLI を用いた。Ca<sup>2+</sup>に交換した天然 CLI 50 g と 0.5 M リン酸アンモニウム 500 mL を 80°C で 24 時間反応させた。反応後、イオン交換法によりゼオライト中のイオン交換サイトを再度 Ca<sup>2+</sup>に置換し、上記水溶液に接触させることを 5 回まで繰り返した。各試料の同定は XRD, 形態観察・元素分析は SEM と EDX を用いて行った。複合体中のリン量は複合体を原液硝酸で溶解後、ICP 発光分光分析装置(ICP-OES)で測定することにより行った。

##### -Cs<sup>+</sup>及び Sr<sup>2+</sup>吸着実験-

複合体(1 回及び 5 回処理)と Ca<sup>2+</sup>型 CLI 2.0 g を Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>濃度をそれぞれ 10~2000 mg/L に調製した塩化セシウム水溶液, または塩化ストロンチウム水溶液 200 mL と 25°C で 24 時間, 80 rpm で振とう接触させた。接触後, 固液分離し, 液相中の Cs<sup>+</sup>濃度は AAS, Sr<sup>2+</sup>濃度は ICP-OES により測定した。

##### -Cs<sup>+</sup>及び Sr<sup>2+</sup>吸着天然 CLI/HA 複合焼成体の評価-

1 回処理の複合体と Ca<sup>2+</sup>型 CLI 30 g を Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>濃度をそれぞれ 1000 mg/L に調製した塩化セシウム水溶液, または塩化ストロンチウム水溶液 300 mL と 25°C で 24 時間, 80 rpm で振とう接触させた。その後乾燥させた各試料 3.0 g をアルミナるつぼに入れ, 電気炉を用いて 800°C, 850°C, 1100°C, 及び 1200°C で 3 時間焼成した。焼成後の複合体は XRD により同定した。Cs<sup>+</sup>及び Sr<sup>2+</sup>溶出試験は焼成体 0.3 g を 0.6 M の NaCl 30 mL と 25°C で 24 時間, 80 rpm で振とう接触させることにより行った。接触後, 固液分離し, 液相中の Cs<sup>+</sup>及び Sr<sup>2+</sup>濃度を AAS 及び ICP-OES で測定した。

#### ・Cs<sup>+</sup>吸着天然MOR/HA複合焼結体によるCs<sup>+</sup>の長期安定化試験

##### -天然 MOR/HA 複合体の作製-

試料として宮城県愛子産天然 MOR を使用した。天然 MOR は 65 μm に粒径を揃えた。天然 MOR 100 g と 0.5 M 塩化カルシウム水溶液 1 L を 1 時間接触させた。この操作を 3 回繰り返し, Ca 型天然 MOR を作製した。得られた Ca 型天然 MOR と 0.5 M リン酸アンモニウム水溶液 1 L を耐熱容器に入れ, 80°C で 24 時間反応させ天然 MOR/HA 複合体を作製した。

##### -天然 MOR/HA 複合焼結体の作製-

複合焼結体の作製に用いる HA は湿式法で合成した。合成した HA は XRD と SEM の結果から, 緻密体を作製する際に最適な高純度の球状 HA 粒子であることが確認された。Cs<sup>+</sup>(2000 mg/L)接触天然 MOR/HA 複合体と焼結助剤を加えた HA は, 複合体の比率が 10~30 wt%になるように調整し, 乳鉢で混合した。その後 2.0 g を加圧成形器で 50 MPa で成形した。得られた成形体は電気炉にて 1200°C で 3 h 焼結した。得られた焼結体は SEM 及び EDX を用いて評価した。

-Cs<sup>+</sup>溶出試験-

Cs<sup>+</sup>(2000 mg/L)接触天然 MOR/HA 複合体を 1 L の純水中に入れ 25°C で 1~72 h, 80 rpm で振とうさせた。その後固液分離を行い、液相中の Cs<sup>+</sup>濃度を AAS により測定した。

4. 4. 4 実施研究の結果

・Cs<sup>+</sup>吸着天然ゼオライトのアルカリ水熱処理と得られた生成物の溶出挙動

-天然 CLI と天然 MOR の Cs<sup>+</sup> 吸着能の評価-

表 4.3.1 に天然 CLI 及び天然 MOR の Cs<sup>+</sup>吸着率を示す。Cs<sup>+</sup>濃度 100 mg/L, 1000 mg/L では、いずれのゼオライトも 99% 以上の Cs<sup>+</sup>吸着率を示し、高い Cs<sup>+</sup>選択性が明らかになった。10000 mg/L では、いずれのゼオライトも吸着率が低下し、最大吸着量に達していることが示唆された。

表 4.3.1 天然クリノプチロライト (CLI) 及び天然モルデナイト (MOR) の Cs<sup>+</sup>吸着率 (%)

Cs 濃度(mg/L)	100	1000	10000
CLI	99.9	99.9	82.3
MOR	99.9	99.9	76.2

-水熱処理により得られた生成物の評価-

図 4.3.1 に処理前及び 10000 mg/L の Cs<sup>+</sup> を吸着させた天然 CLI (吸着率 82.3%) を 1 M NaOH 中で 100°C, 150°C, 200°C で水熱処理して得られた生成物の XRD パターンを示す。100°C では Na-P1 型ゼオライトが、150°C では Na-P1 型ゼオライトとアナルサイムが、200°C ではアナルサイムの回折線が強く見られた。

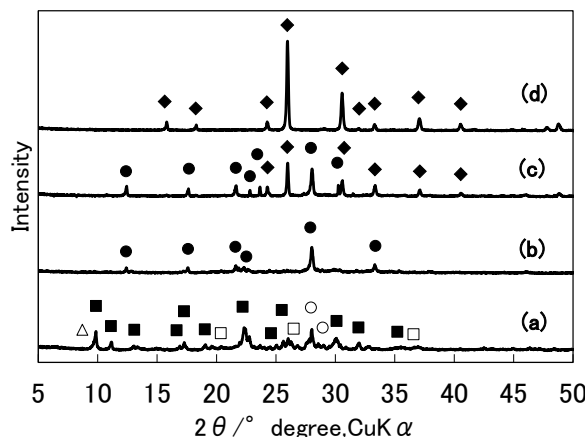


図 4.3.1 処理前及び 1 M NaOH 中において各温度で水熱処理して得られた生成物の XRD パターン (a) 処理前 (b) 100°C (c) 150°C (d) 200°C

◆ : アナルサイム ● : Na-P1  
△ : 層状ケイ酸塩 ■ : クリノプチロライト □ : 石英 ○ : 長石

図 4.3.2 に 1 M NaOH 中において 100°C と 200°C で得られた生成物の SEM 像を示す。100°C では Na-P1 型特有のバラ状凝集粒子が、200°C ではアナルサイム特有の多面体結晶が観察された。図 4.3.3 に 1~3 M NaOH 中において 200°C で水熱処理して得られた生成物の XRD パターンを示す。3 M ではアナルサイムの他にカンクリナイトの回折線が見られ、1 M と 2 M ではその回折線は、ほとんど見られなくなった。

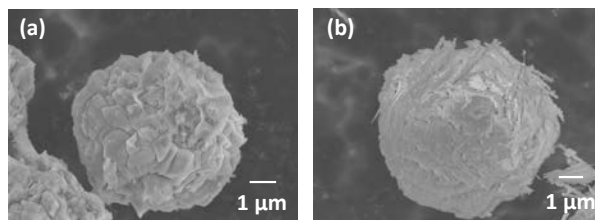


図 4.3.2 100°C (a) 及び 200°C (b) で得られた生成物の SEM 像

また 100°C の水熱処理では NaP1 型ゼオライトが、150°C ではアナルサイムと NaP1 型ゼオライトが主成分であること、ゼオライト中の Cs<sup>+</sup>吸着量の増加に伴い、150°C におけるアナルサイムの生成量が増加することが確認された。これらの結果は天然 MOR においてもほぼ同様であったが、天然 CLI と比較してアナルサイムの生成領域が広がった。この結果は天然 MOR の Si/Al

モル比が天然 CLI と比較して大きく、Si/Al モル比の大きいアナルサイムが優先して生成したためと考えられる。  
-アルカリ水熱処理時の Cs<sup>+</sup> 保持率-

図 4.3.4 に各水熱条件における処理時の Cs<sup>+</sup> 保持率を示す。高い NaOH 濃度ほど、Na<sup>+</sup> とのイオン交換反応が起こるため Cs<sup>+</sup> 保持率が低くなると考えられるが、アナルサイムが生成した 200℃ ではその減少率が低かった。この結果は 200℃ で生成したアナルサイムの細孔径(0.22 nm)が Cs<sup>+</sup> 直径(約 0.36 nm)より小さいことに起因すると考えられる。

図 4.3.5 に 200℃、1 M で得られたアナルサイム結晶断面の TEM-EDX 分析結果を示す。アナルサイム多面体結晶断面の TEM 像(図 4.3.5(a))の分析点 1, 2, 3 の EDX 分析結果(図 4.3.5(b))からアナルサイムを示す Si, Al のピークの他に Cs が検出された。この結果から Cs<sup>+</sup> がアナルサイム中に保持されていることが明らかになっている(表面の針状結晶はケイ酸カルシウム: Cs<sup>+</sup> は存在していない。(分析点 4))。

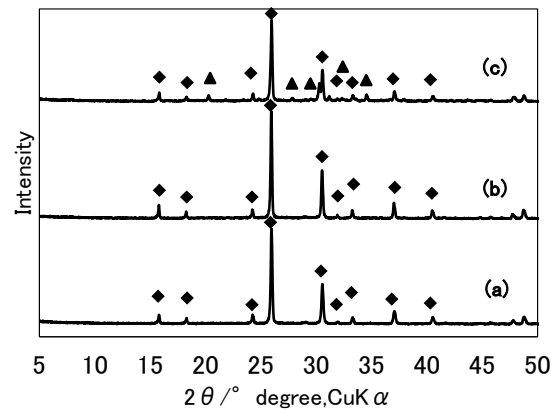


図 4.3.3 1~3 M NaOH 中において 200℃ で水熱処理して得られた生成物の XRD パターン(a) 1 M (b) 2 M (c) 3 M  
◆ : アナルサイム ▲ : カンクリナイト

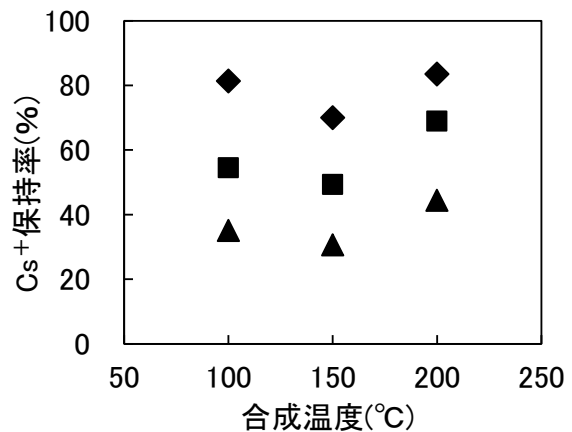


図 4.3.4 アルカリ水熱処理時の Cs<sup>+</sup> 保持率 (Cs<sup>+</sup> 濃度 10000 mg/L) ▲ : 1 M ■ : 2 M ◆ : 3 M

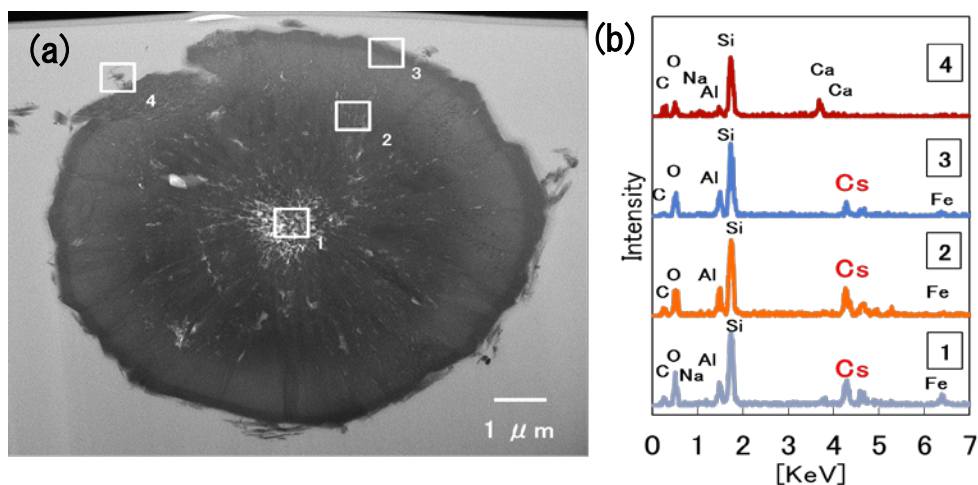


図 4.3.5 アナルサイム多面体結晶断面の TEM 像(a)と EDX 分析結果(b)

-生成物の Cs<sup>+</sup> 溶出率-

図 4.3.6 に 0.6 M NaCl と 24 時間接触させた各生成物の Cs<sup>+</sup> 溶出率を示す。反応前の天然 CLI は 34.6% の高い Cs<sup>+</sup> 溶出率を示した。また NaP1 型が生成した 100℃ においても高い溶出率を示した。しかし、アナルサイムが生成した 150℃ ~ 200℃ では溶出率が低下し、特にアナルサイム純度が高かった 200℃, 1 M では 1 % 以下の低い溶出率を示した。この結果は、CLI 型、NaP1 型、及びカンクリナイトの細孔径が Cs<sup>+</sup> 直径より大きいものに対して、アナルサイムの細孔径が小さいことに起因すると考えられる。これらの結果は天然 MOR から得られた生成物においてもほぼ同様な傾向であった。なお石炭飛灰のアナルサイム化を利用した Cs<sup>+</sup> の安定化も同様な方法で可能であることを報告している<sup>11)</sup>。

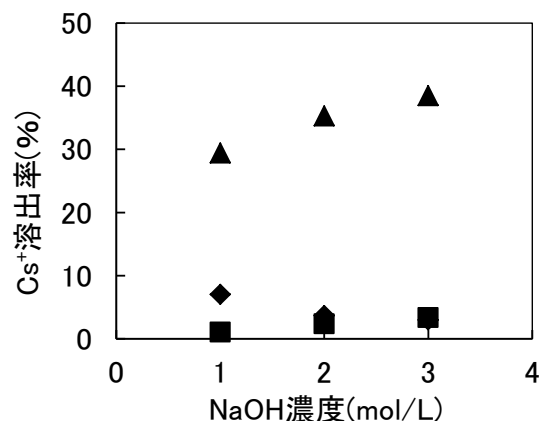


図 4.3.6 0.6 M NaCl 中における生成物の Cs<sup>+</sup> 溶出率 (Cs<sup>+</sup> 濃度 10000 mg/L) ▲ : 100℃ ◆ : 150℃ ■ : 200℃

・天然 CLI/HA 複合体による Cs<sup>+</sup> と Sr<sup>2+</sup> の吸着・安定化

-天然 CLI/HA 複合体の評価-

図 4.3.7 に 1 回及び 5 回リン酸アンモニウム処理した複合体粒子表面の SEM 像を示す。1 回処理では粒子表面に約 100 ~ 200 nm の鱗片状結晶が部分的に観察された(図 4.3.7(a))。5 回処理では 1 回処理と比較して CLI の板状結晶表面に多くの針状結晶が観察された(図

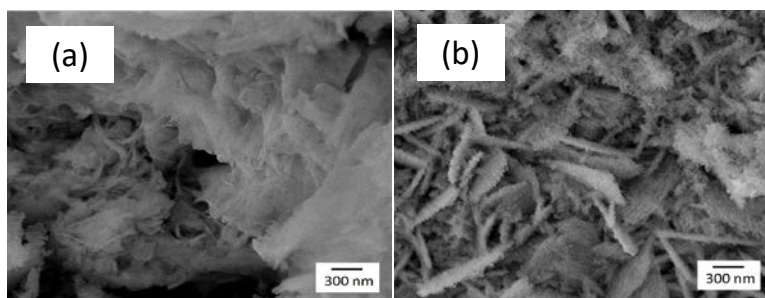


図 4.3.7 1 回及び 5 回リン酸アンモニウム処理した複合体粒子表面の SEM 像 (a) 1 回処理 (b) 5 回処理

4.3.7(b))。この結晶は XRD 図の 32 度付近に見られる幅広い回折線から HA であることが示唆された。また EDX 分析において HA の主成分である Ca と P のピークが検出されたことから HA であることが示唆された。複合体中の P 量の測定結果からはリン酸アンモニウム処理回数の増加に伴い P 量が増加する傾向にあり、P を主成分とする HA の形成量が増加したことを示している。

-Cs<sup>+</sup> 及び Sr<sup>2+</sup> 吸着能の評価-

表 4.3.2 に Ca<sup>2+</sup> 型天然 CLI と 1 回及び 5 回リン酸アンモニウム処理した複体の初期濃度 100 mg/L における Cs<sup>+</sup> 及び Sr<sup>2+</sup> 吸着率を一例として示す。Cs<sup>+</sup> 吸着率はいずれも 97 % 以上の高い値を示した。こ

表 4.3.2 Ca<sup>2+</sup> 型 CLI と 1 回及び 5 回リン酸アンモニウム処理した複体の Cs<sup>+</sup> 及び Sr<sup>2+</sup> 吸着率 (%)

	Ca <sup>2+</sup> 型 CLI	複合体 (1 回処理)	複合体 (5 回処理)
Cs <sup>+</sup>	97.47	97.23	99.99
Sr <sup>2+</sup>	86.71	95.02	100.0

の結果は HA 形成後も CLI の Cs<sup>+</sup>吸着能を保持していることを示している。Sr<sup>2+</sup>吸着率は Ca<sup>2+</sup>型 CLI が 86.71 % に対して、複合体 1 回処理では 95.02 % , 5 回処理では 100.0 % となり、HA 形成量が Sr<sup>2+</sup>吸着率を向上させる要因となることが明らかになった。

-Cs<sup>+</sup>及び Sr<sup>2+</sup>吸着天然 CLI/HA 複合焼成体の評価-

図 4.3.8 に各温度で焼成した複合体及び Ca<sup>2+</sup>型 CLI の 0.6 M NaCl 中における Cs<sup>+</sup>及び Sr<sup>2+</sup>溶出率を示す。焼成前では Cs<sup>+</sup>溶出率は 26.3 % , Sr<sup>2+</sup>溶出率は 37.2 % であったのに対して 800℃ と 850℃ で焼成した複体の Cs<sup>+</sup>溶出率は増加し、Sr<sup>2+</sup>溶出率は減少した。1100℃ 以上では、いずれの溶出率も検出限界以下となった。これらの結果は Ca<sup>2+</sup>型 CLI においてもほぼ同様の傾向を示した。800℃ や 850℃ の XRD パターンは、石英と長石の回折線を示し、1100℃ と 1200℃ ではそれらのピークが強く見られた。この結果は 800℃ 付近で CLI の非晶質化や石英、長石への相変化が起こり、1100℃ と 1200℃ で石英と長石の結晶成長が起きたことを示している。これらの結果から 800℃ 付近の Cs<sup>+</sup>の溶出は CLI の相変化に起因する構造破壊によるものと考えられる。一方 Sr<sup>2+</sup>溶出率が低い原因は HA 構造中に Sr<sup>2+</sup>が安定に存在することや Sr 長石として低温で安定鉱物化したためと考えられる。また 1100℃ 以上では石英や長石が結晶成長するため、Cs<sup>+</sup>、Sr<sup>2+</sup>共にそれらに取り込まれ安定化したと考えられる。以上の結果から Cs<sup>+</sup>及び Sr<sup>2+</sup>の安定化には 1100℃ 以上の焼成が望ましいと言える。

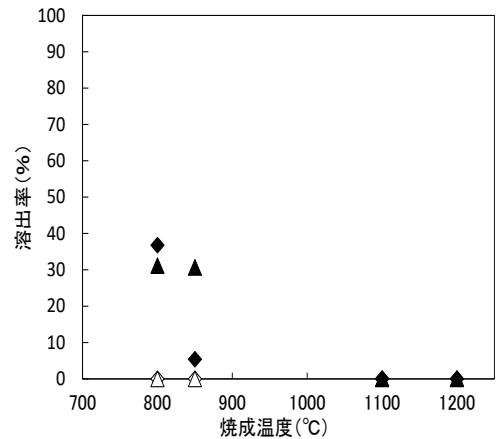


図 4.3.8 各温度で焼成した複合体及び Ca<sup>2+</sup>型 CLI の 0.6 M NaCl 中における Cs<sup>+</sup>及び Sr<sup>2+</sup>溶出率  
Cs<sup>+</sup>◆: Ca<sup>2+</sup>型 CLI ▲: CLI/HA 複合体  
Sr<sup>2+</sup>◇: Ca<sup>2+</sup>型 CLI △: CLI/HA 複合体

・Cs<sup>+</sup>の長期安定化に関する研究

-天然 MOR/HA 複合焼結体の評価-

図 4.3.9 に 1200℃ で焼結した複合体 30 % 含有焼結体の写真を示す。割れのない緻密な焼結体を得られている。EDX 分析結果からはゼオライト部（焼結後は石英または長石相）にゼオライト由来の Si, Al 及び Ca の他に Cs が検出され、HA 部には Cs が検出されなかった。これらの結果は 1200℃ の焼成においても



図 4.3.9 1200℃ で焼結した複合体 30 % 含有焼結体

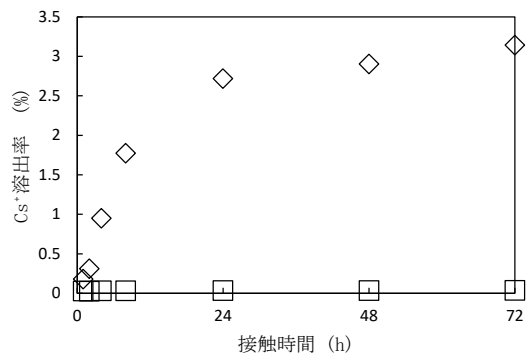


図 4.3.10 複合体 30 % 含有焼結体と複合体 30 % 含有セメント固化体の純水中における接触時間と Cs<sup>+</sup>溶出率の関係  
□: 複合体 30% 含有焼結体  
◇: 複合体 30% 含有セメント固化体

ゼオライト部に Cs を保持していることを示している。図 4.3.10 に複合体 30 % 含有焼結体及び比較試料として複合体 30 % 含有させたセメント固化体（簡易セメント）の純水

中での接触時間と Cs<sup>+</sup>溶出率の関係を示す。複合焼結体はセメント固化体と比較して低い Cs<sup>+</sup>溶出率を示した。また複合焼結体は接触初期に僅かに Cs<sup>+</sup>溶出を示すものの、その後はほとんど溶出しないことが明らかになった。これらの結果から複合焼結体はセメント固化体と比較しての溶液安定性に優れることが明らかになった。

#### 4. 4. 5 実施研究のまとめ

本研究により、以下の結果が得られた

- ・天然ゼオライト及び石炭飛灰からアルカリ水熱処理して得られたアナルサイム系ゼオライトは Cs<sup>+</sup>の水熱処理過程での保持能が高く、高い溶液安定性を示す。
- ・天然 CLI に HA を形成した複合体を用いることで Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率的な回収が可能である。また 1100℃以上の焼成により、長石や石英などに相変化（安定鉱物化）し、水溶液中への溶出を抑制できる。
- ・常圧下において 1200℃で焼結した Cs<sup>+</sup>吸着 MOR/HA 複合焼結体は、セメント固化したものと比較して高い溶液安定性を示す。

以上の結果はゼオライトによる放射性 Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収と長期安定化に関する基礎データとして利用が期待できる。

#### 4. 4. 6 今後の課題

本年度はゼオライト転換を利用した Cs<sup>+</sup>の安定化、天然 CLI/HA 複合体による Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収と安定化、及び天然 MOR/HA 複合焼結体による長期安定化に関する基礎データを収集した。ゼオライト転換に関しては Si や Al を含有する焼却灰（枯れ葉を燃焼）においても有効であることが明らかになっているため、今後焼却灰や様々な土壌のゼオライト転換の検討を行い、実用的な研究へと発展させる。天然 CLI/HA 複合体による Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収と安定化に関しては、長期安定固化（アパタイト固化等）に関する適用を検討する。天然 MOR/HA 複合焼結体による長期安定化に関しては、焼結温度依存性や XRD による構造評価を行い更なる安定性向上に向けた最適化を行う。

#### 4. 4. 7 参考文献

- 1) 山岸功, 三村均, 出光一哉 (2012) 福島第一原子力発電所高汚染水の処理処分の課題, 日本原子力学会誌 特集記事, 54(3), 166-170.
- 2) 伊藤健一, 宮原英隆, 氏家亨, 武島俊達, 横山信吾, 中田弘太郎, 永野哲志, 佐藤努, 八田珠郎, 山田裕久 (2012) 湿式分級洗浄および天然鉱物等による農地土壌等に含まれる放射性セシウム除去方法の実践的検討, 日本原子力学会誌, 11(4), 255-271.
- 3) 放射性物質の除去・回収技術のためのデータベース (READS) (2011), (独) 物質・材料研究機構マテリアルデータベースサイト (MatNavi) <http://nits.nims.go.jp>.
- 4) 渡辺雄二郎, (2011) ゼオライトの性能と放射性物質の除去技術, 無機マテリアル学会 第21回講習会テキスト, 21, 49-59.
- 5) 福島第一原子力発電所内汚染水処理技術のための基礎データ収集 (2011) 日本原子力学会ホームページ <http://www.nuce-aesj.org/doku.php?id=projects:clwt:start>.

- 6) セシウムをどうする 福島原発事故除染のための基礎知識 (2012), 小松優監修, 日本イオン交換学会編, 日刊工業新聞社 125-140
- 7) 平成24年度(独)日本原子力研究開発機構 委託研究「粘土鉱物に対する放射性物質の吸脱着機構解明と減容法の開発」報告書(2013).
- 8) 渡辺雄二郎, 鈴木憲子, 山田裕久, 藤永薫, 小松優 (2013) “カチオン種の異なる各種ゼオライトによるセシウムイオンの回収と固定化” 日本イオン交換学会誌 24[3], 75-81.
- 9) 平成25年度(独)日本原子力研究開発機構 委託研究「粘土鉱物に対する放射性物質の吸脱着機構解明と減容法の開発」報告書(2014).
- 10) 高桑寛, 岩田裕介, 大嶋俊一, 藤永薫, 山田裕久, 小松優, 渡辺雄二郎 “各種天然及び合成モルデナイトのセシウムイオン吸着能の評価” 第17回日本セラミックス協会北陸支部秋季研究発表会, 金沢, 2013年 11月.
- 11) 北中康揮, 山田裕久, 大嶋俊一, 藤永薫, 小松優, 渡辺雄二郎 ” アルカリ水熱合成法による石炭飛灰のゼオライト転換を利用したセシウムイオンの安定化” 2014年度日本セラミックス協会北陸支部秋季研究発表会 2014年 11月.

## 4.5 低結晶質粘土鉱物・非晶質物質における Cs 吸着特性脱着挙動の検討

### 4.5.1 研究報告の概要

非晶質および低結晶性アルミニウムケイ酸塩における Cs 吸着特性脱着挙動の検討を行うため、天然アロフェン、合成アロフェン、合成イモゴライト、合成非晶質アルミニウムケイ酸塩における、塩化セシウムを用いた吸着試験および、吸着後に純水を用いた脱離試験を行った。

Cs 吸着量としては、合成非晶質アルミニウムケイ酸塩>合成アロフェン>合成イモゴライト>天然アロフェンの順であり、合成品においては Si/Al モル比が高いほど吸着量が多いことが示された。

次に Cs を吸着させた後に、純水を加えて脱離試験を行ったところ、1000ppm の濃度での Cs を吸着させた試料では、天然アロフェンおよび合成イモゴライトそれぞれ 61%、22%の割合の Cs を脱離していたが、合成アロフェンおよび合成非晶質アルミニウムケイ酸塩では、ほとんど Cs を脱離していなかった。この結果より、非晶質物質においても Cs を相当量吸着し、純水では溶け出さないほどの吸着力を有していることが明らかとなった。

### 4.5.2 実施報告の背景・目的

福島県の土壌において、放射性Csは粘土鉱物、中でも層状ケイ酸塩鉱物の風化雲母鉱物やパーミキュライトに強く吸着されていると考えられている。その一方で、福島県では、安達太良山などの阿武隈山地の火山の噴火に起因する火山灰が降り積もり、火山灰が風化したものが土壌となっている場所も存在する<sup>1)</sup>。火山灰の風化によってできた土壌には、アロフェンやイモゴライトの非晶質物質や低結晶性鉱物が含まれていることが多いが、これらの物質は反応性が高く、吸着特性に優れている可能性がある<sup>2)</sup>。アロフェン・イモゴライトは、層状ケイ酸塩鉱物ではないため四面体シートは存在しないが、中空構造の内側にはSi-OH基が突き出ており、これが解離すれば負電荷を発生させCsがある程度強い力で吸着される可能性があることから、これらの物質の内側がCsの吸着サイトとして存在する可能性がある<sup>3)</sup>。

またこの4年間に、様々な除染技術が開発されているが、化学処理(薬液処理)においては、シュウ酸を用いた効率的なCs溶出法が開発されている<sup>4)</sup>。シュウ酸は土壌における非晶質物質の定量の際に用いられる試薬であることから鑑みると、シュウ酸によってCsの溶出率が高い土壌は、非晶質物質を多く含む可能性もある。そして現在では、非晶質アルミニウムケイ酸塩によるCs吸着剤も開発されている<sup>5)</sup>。土壌の表層は、風化が進んでおり、その風化過程では土壌中の鉱物が溶解・析出することにより準安定相の非晶質物質が生成し、非晶質物質が多く含まれている可能性は高く、非晶質物質が現在の福島県の土壌におけるCsの吸着の一つの因子となっている可能性は捨てることができない。

その一方で、過去においてアロフェンに関するCsの吸着実験が行われている。津村らは、アロフェンはカオリナイトよりも多くのCsを固定態として吸着すること、アロフェンおよびイモゴライトの含量が高い黒ボク土である盛岡土壌を薄層クロマトグラフィーの担体とし酢酸アンモニウム水溶液でCsを展開した場合には一部のCsは固定態として原点付近に強く残ること、同じ薄層プレートでCsを0.5M HClで展開すると固定反応は見られないことを示している<sup>6)</sup>。この結果について、山口らはアロフェンおよびイモゴライトは、0.5 M HCl 程度の酸により溶解されることから、この黒ボク土中でCsをある程度強く吸着していたのは(酢酸アンモニウムで抽出されない形態でCsを吸着していたのは)アロフェンおよびイモゴライトである可能性があるとし

ている<sup>7)</sup>。それ以外にもいくつかのアロフェンの Cs 吸着に関しての実験が行われているが、非放射性の安定 Cs を大量に添加したりなど、今回の放射性 Cs を含む土壌のように、ごく微量の放射性セシウムのアロフェン・イモゴライトへの吸着に関する検討は行われていない。そしてこのアロフェン・イモゴライトの Cs 吸着に関する知見は、これらの物質を多量に含む黒ボク土から放射性 Cs を除去する際に、重要になるとされている。

以上の背景から、最終的には以下の 4 点を明らかにする必要があると考えられる。

- ① アロフェン・イモゴライトおよび非晶質アルミニウムケイ酸塩における Cs 吸脱着性能の把握
- ② 福島県の土壌における非晶質物質の定量
- ③ 福島県の土壌における非晶質物質における Cs 吸着量
- ④ 福島県の土壌における非晶質物質からの Cs 脱離の可能性

そして上記の結果により、福島県の土壌における非晶質物質と放射性セシウムの関係性を明らかにするとともに、仮置き場等における大量の汚染土壌の除染および減容化に結び付く知見を提供することを目的としている。

H24 年度は、②福島県の土壌における非晶質物質の定量および、非晶質物質の Cs 吸着量に関しての大まかな把握を目的とした検討を行った。

H25 年度は、①アロフェン・イモゴライトおよび非晶質アルミニウムケイ酸塩における Cs 吸脱着性能の把握、③福島県の土壌における非晶質物質における Cs 吸着量、④福島県の土壌における非晶質物質からの Cs 脱離の可能性について、安定 Cs を用いての大まかな把握を目的とした実験を行い、非晶質物質における Cs の吸着および脱離について調査・実験を行う必要性があるか否かについての検討を行った。

今年度については、H25 年度に行った①アロフェン・イモゴライトおよび非晶質アルミニウムケイ酸塩における Cs 吸脱着性能の把握について、さらなる検討を行った。

### 4.5.3 試験方法

#### 4.5.3.1 Cs 吸脱着試験に用いた試料

今年度のアロフェン・イモゴライトおよび非晶質アルミニウムケイ酸塩における Cs 吸脱着性能の把握については、天然アロフェン(市販品)、合成アロフェン、合成イモゴライト、Si/Al モル比が 5 の合成非晶質アルミニウムケイ酸塩の計 4 種類を用いた。

#### 4.5.3.2 Cs 吸着実験方法

Cs の吸着試験においては、バッチ式の吸着実験により行い、物質・材料研究機構が公開している手順に従って吸着実験を行った<sup>8)</sup>。Cs 源としては塩化セシウム試薬を用いた。50mL 容量の遠沈管に、固体試料約 0.4g を量り取り、各濃度に調整した Cs 溶液 40mL を遠沈管に添加し試料を分散させた。このときの固液比は 1:100 の条件として行った。試料分散後、回転式ローターミックスにおいて 24 時間分散液を攪拌し、攪拌終了後、遠心分離を行い(3000r.p.m にて 5 分)、上澄みを孔径を変えた 4 種類のメンブレンフィルター(孔径サイズ 0.05, 0.25, 0.1, 0.45  $\mu$ m)を用いて固液分離を行った。回収した溶液については、ICP-MS により Cs 濃度の分析を行った。Cs 吸着実験に用いた塩化セシウム濃度は、0.05, 0.5, 5, 50, 100, 1000ppm の 6 種類にて行った。

#### 4.5.3.3 Cs 脱離実験方法

Cs の脱離試験においては、吸着試験後の試料に純水を添加し、Cs が脱離するかどうかの検討を行った。4.5.3.2 の Cs 吸着実験において遠心分離後、可能な限りの溶液をピペット等で取り除き、残った溶液量については、ピペットで溶液を取り除いた際の重量から、空の遠沈管に約 0.4g

の試料を添加した際の重量を差し引くことによって求めた。ピペットで溶液を取り除いた容器に、約 40mL の純水を加え試料を分散させた。試料分散後、回転式ローターミックスにおいて 24 時間分散液を攪拌し、攪拌終了後、遠心分離を行い(3000r.p.m にて 5 分)、上澄みを孔径 0.45 $\mu$ m のメンブレンフィルターを用いて固液分離を行った。回収した溶液については、ICP-MS により Cs 濃度の分析を行った。

#### 4.5.4 実施研究の結果

##### 4.5.4.1 Cs 吸着試験

天然アロフェン、合成アロフェン、合成イモゴライト、合成非晶質アルミニウムケイ酸塩において、0.05~1000ppm の範囲に Cs を吸着させた際の Cs 吸着率の結果を図 4.5.1 に示す。

天然アロフェンでは、Cs 濃度が 0.05ppm ではほぼ 100%吸着したが、Cs 濃度が 0.5ppm より大きくなるにつれて、Cs の吸着率は低下し、Cs 濃度が 50ppm にて数%、Cs 濃度が 100ppm 以上ではほとんど吸着しない結果であった。

一方合成アロフェンでは、Cs 濃度が 5ppm まではほぼ 100%吸着していたが、Cs 濃度が 50ppm では 97%の吸着率になり、Cs 濃度が 100ppm では吸着率 50%程度、Cs 濃度 1000ppm では吸着率 5%程度まで減少していた。

次に合成イモゴライトでは、Cs 濃度が 0.5ppm まではほぼ 100%吸着していたが、Cs 濃度が 5ppm で吸着率 95%程度、Cs 濃度 50ppm で吸着率 65%前後、Cs 濃度 100ppm で吸着率 30%程度と減少し、Cs 濃度 1000ppm では吸着率 5%程度まで減少していた。

そして Si/Al モル比 5 の非晶質アルミニウムケイ酸塩では、Cs 濃度 5ppm まではほぼ 100%吸着しており、Cs 濃度が 50ppm、100ppm、1000ppm と濃度が高くなるにつれて、吸着率は減少するが、Cs 濃度 1000ppm でも 85%程度の吸着率を示していた。

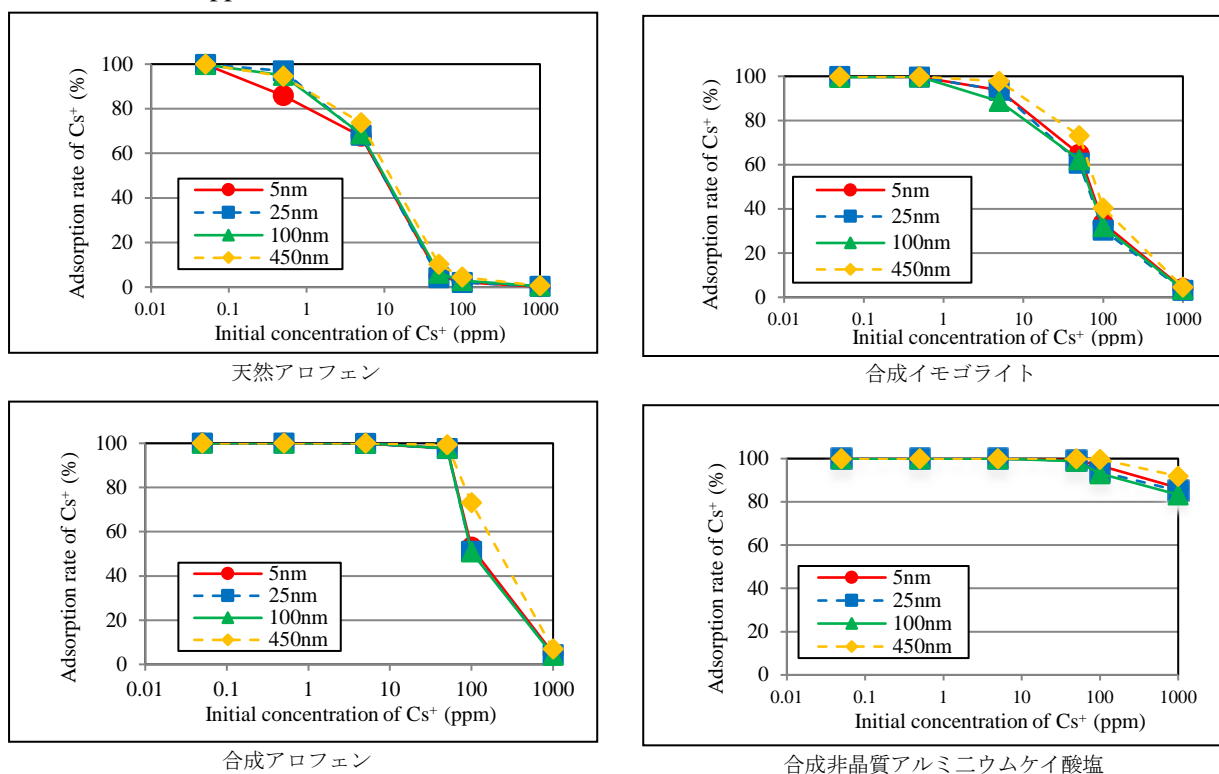


図 4.5.1 非晶質および低結晶性アルミニウムケイ酸塩における Cs 吸着率

吸着量としては、

合成非晶質アルミニウムケイ酸塩>合成アロフェン>合成イモゴライト>天然アロフェンの順であった。

天然アロフェンの方が合成アロフェンより吸着率が低かった理由としては、天然アロフェンにおける不純物の影響が挙げられるが、Cs 濃度 50ppm において天然アロフェンはほとんど吸着しないのに対し、合成アロフェンでは大部分が吸着されている。このことは、もともとアロフェンには Cs を吸着するサイトが存在するが、天然アロフェンではこのサイトがすでに他の元素を吸着しており Cs を吸着するサイトが減少しているためと捉えることもできる。

合成品においては、合成イモゴライト、合成アロフェン、合成非晶質アルミニウムケイ酸塩の順に吸着量が多くなる傾向を示していたが、その一つの理由として Si/Al モル比が考えられる。合成イモゴライト、合成アロフェン、合成非晶質アルミニウムケイ酸塩の Si/Al モル比は、それぞれ 0.5, 0.9, 5.0 であり、Si/Al モル比が大きくなるにつれて吸着量は増加していた。非晶質および低結晶質アルミニウムケイ酸塩における Cs の吸着サイトは、Si-OH 基の解離によるものとされており、Si/Al モル比が大きくなるにつれ単位重量当たりの Cs 吸着量は多くなると推測される。そしてイモゴライトの場合では、チューブの中に Si-OH 基が存在するため、外表面に Si-OH 基が存在する場合と異なり、形状が Cs の吸着効率を低下させている可能性もある。見方を変えれば、非晶質物質あるいは低結晶性物質における Cs 吸着量は、外表面に存在する Si-OH 基の存在量を示している可能性もある。

#### 4.5.4.2 非晶質物質における Cs 吸脱着試験

4.5.4.1 にて吸着試験を行った試料のうち、フィルター孔径 450nm の試料について脱離試験を行った結果を表 4.5.1 に示す。

天然アロフェンおよび合成イモゴライトにおいては、Cs 吸着時の Cs 濃度が 0.05ppm および 0.5ppm においても若干の脱離が確認されたが、その大部分は脱離しなかった。一方 Cs 吸着時の Cs 濃度が、100 および 1000ppm においてはかなりの量の Cs が脱離していた。

合成アロフェンおよび合成非晶質アルミニウムケイ酸塩においては、合成アロフェンにおいて Cs 濃度 1000ppm にて吸着させた試料以外は、ほとんど純水中に脱離しないことが示された。

表 4.5.1 非晶質物質および低結晶性物質の Cs 脱離率 (%)

	天然アロフェン	合成イモゴライト	合成アロフェン	合成非晶質アルミニウムケイ酸塩
0.05	5.2	1.2	0.01	0.00
0.5	6.1	1.5	0.03	0.00
5	7.2	2.0	0.05	0.02
50	8.6	3.1	0.06	0.00
100	20.7	5.2	0.04	0.00
1000	60.7	22.8	7.24	0.13

#### 4.5.5 実施研究のまとめ

非晶質および低結晶性アルミニウムケイ酸塩における Cs 吸着特性脱着挙動の検討を行うため、天然アロフェン、合成アロフェン、合成イモゴライト、合成非晶質アルミニウムケイ酸塩における、塩化セシウムを用いた吸着試験および、吸着後に純水を用いた脱離試験を行った。

その結果 Cs 吸着量は、合成非晶質アルミニウムケイ酸塩>合成アロフェン>合成イモゴライト>天然アロフェンの順であり、合成品においては Si/Al モル比が高いほど吸着量が多いことが示された。Si/Al モル比が 5 の非晶質アルミニウムケイ酸塩においては、Cs 濃度が 1000ppm においても約 65% の Cs を吸着した。

次に Cs を吸着させた後に、純水を加えて脱離試験を行ったところ、1000ppm の濃度での Cs を吸着させた試料では、天然アロフェンおよび合成イモゴライトそれぞれ 61%、22% の割合の Cs を脱離していたが、合成アロフェンおよび合成非晶質アルミニウムケイ酸塩では、ほとんど Cs を脱離していなかった。

以上の結果より、非晶質物質においても Cs を相当量吸着し、純水では溶け出さないほどの吸着力を有していることが明らかとなった。

#### 4.5.6 今後の課題

今回の非晶質物質および低結晶性物質の吸脱着試験から、非晶質物質においても Cs を相当量吸着し、また純水には吸着した Cs を容易に脱離しないことが明らかとなった。実際には雨水が土壌中に入ると様々な成分が含まれるようになる。今後としては、粘土鉱物における Cs 脱離試験と同様に、各試薬を用いることによる脱離性能を調べ、非晶質物質および低結晶性物質の脱離性能を調べる必要がある。それらの結果を基に、非晶質物質が初期 Cs の吸着にどのようにかかわっているのかについて検討を行うことが求められる。

#### 4.5.7 参考文献

- 1) 三枝正彦, 松山信彦, 阿部篤郎 (1993) 東北地方におけるアロフェン質黒ボク土と非アロフェン質黒ボク土の分布。日本土壌肥科学雑誌, 64, 423-430
- 2) 鈴木正哉 (2012) アロフェン・イモゴライトの合成と応用, 粘土科学, 50, 81-87。
- 3) 粘土ハンドブック第 3 版 (2009) pp88-92。技報堂出版。
- 4) 平成 23 年度「除染技術実証試験事業」概要 (2012) 原子力委員会, 18-19, <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siry02012/siry07/siry01-2.pdf>
- 5) 末益匠, 鈴木正哉, 犬飼恵一, 前田雅喜, 月村勝宏, 片元勉 (2011) Cs 吸着能を持つ非晶質アルミニウムケイ酸塩の開発とその吸着特性, 粘土科学討論会講演要旨集第 55 号, 80-81。
- 6) 津村昭人, 駒村美佐子, 小林宏信 (1984) 土壌及び土壌-植物系における放射性ストロンチウムとセシウムの挙動に関する研究, 農業技術研究所報告B, 36, 57-113。
- 7) 山口紀子, 高田裕介, 林健太郎, 石川覚, 倉俣正人, 江口定夫, 吉川省子, 坂口敦, 朝田景, 和穎朗太, 牧野知之, 赤羽幾子, 平舘俊太郎 (2012) 土壌-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因, 農業環境技術研究所報告, 31, 75-129。
- 8) (独)物質・材料研究機構 物質・材料データベース. <http://reads.nims.go.jp/>

## 5. 粘土鉱物への Cs 吸着の理論的アプローチ

### 5. 1 イオン交換に伴うモンモリロナイトの膨潤挙動の変化

#### 5. 1. 1 目的

本グループでは、「放射性元素の粘土への吸脱着機構の解明および廃棄物減容法開発」の研究課題の内、膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトの層間イオンの安定性について、分子動力学 (Molecular dynamics, MD) 計算から評価した。一部の長半減期低発熱性廃棄物 (TRU 廃棄物) に高濃度に含まれる硝酸イオンは、地下深部の処分環境下では、還元されてアンモニウムイオン ( $\text{NH}_4^+$ ) に変化する可能性がある。アンモニウムイオンは他の 1 価の陽イオン ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ) と比較して、スメクタイト中の層間イオンとして交換されやすく、 $\text{NH}_4^+$  型のスメクタイトが、放射性廃棄物処分場において期待されている低透水性や低拡散性を保持できるのかを調査する必要がある。また  $\text{NH}_4^+$  イオンがスメクタイトに与える影響を原子スケールから研究することで、放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の物性予測に役立つ基礎を構築することが必要となる。本研究では、 $\text{NH}_4$  型モンモリロナイトと  $\text{K}$  型モンモリロナイトの膨潤挙動を MD 計算により評価することで、モンモリロナイト中の  $\text{NH}_4^+$  イオンの性質を明らかにすることを目的とする。

#### 5. 1. 2 計算方法

MD 計算は、経験的な力場に基づく古典 MD 計算法を採用した。ポテンシャル関数・パラメータは Kawamura モデル[1]を採用した。モンモリロナイトの計算については、(001)面の大きさを  $30 \times 30 \text{ \AA}^2$  以上にとり、ユニットセル内に 2 層のモンモリロナイト層を含む構造とした。温度・圧力を 298 K, 0.1 MPa に設定し、 $NPT$  アンサンブルを実行した。

#### 5. 1. 3 計算結果

##### ・ $\text{NH}_4^+$ 原子間相互作用モデルの開発

我々が過去の文献を調査した限り、 $\text{NH}_4$  分子内振動を考慮したフレキシブル  $\text{NH}_4^+$  原子間相互作用モデルは存在せず、赤外吸収スペクトル等の実験結果と今後比較することを視野に入れて、フレキシブル  $\text{NH}_4^+$  原子間相互作用モデルを開発した。ポテンシャル関数は Kawamura モデル[1]を採用した。図 5.1.1 にこのモデルによる  $\text{NH}_4\text{Cl}$  の結晶構造の MD 計算結果を示す。室温において実験値から 0.1% 以下の差で格子定数を再現し、構造も  $\text{CsCl}$  型を再現している。 $\text{NH}_4\text{Cl}$  中の  $\text{NH}_4^+$  の振動スペクトルは、 $1399.9 \text{ cm}^{-1}$

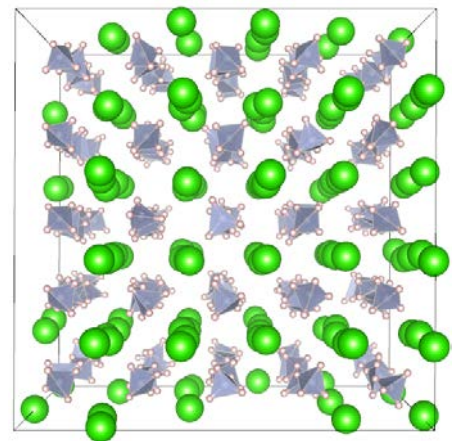


図 5.1.1 開発した  $\text{NH}_4^+$  モデルによる  $\text{NH}_4\text{Cl}$  結晶構造の再現。

と  $1746.5 \text{ cm}^{-1}$ 、 $2800 \sim 3200 \text{ cm}^{-1}$  にピークを持ち、実験値 ( $1400, 1755 \text{ cm}^{-1}$ ) [2] を  $10 \text{ cm}^{-1}$  以内の差で再現している。また実験値でも  $2800 \sim 3200 \text{ cm}^{-1}$  付近にややブロードなピークが見える。本モデル計算による  $\text{NH}_4^+$  イオンと  $\text{Cl}^-$  イオンを水に溶かした場合の混合エンタルピー  $\Delta H_{\text{mix}}$  を  $\text{Na}^+$  や  $\text{K}^+$  モデルとともに表 5.1.1 に示す。各陽イオンの水和エンタルピー差は  $\Delta H_{\text{mix}} - \Delta H_{\text{mix}}(\text{NH}_4^+)$  から見積もることができる。ギブスの水和自由エネ

ルギー $\Delta G$ の実験値[3]との比較から、これらのイオンのモデルが、水和に関して良いモデルであることがわかる。

表 5.1.1 298 Kにおける各陽イオンの混合エンタルピーと水和エンタルピー差

$M^+$	$\Delta H_{\text{mix}}(M^+ + Cl^-)$ (kJ/mol)	$\Delta H_{\text{mix}} - \Delta H_{\text{mix}}(NH_4^+ + Cl^-)$ (kJ/mol)	$\Delta G - \Delta G(NH_4^+)$ (kJ/mol)[exp.][3]
$NH_4^+$	-27.3	0	0
$K^+$	-30.0	-2.7	-10.0
$Na^+$	-97.8	-70.5	-80.0

・  $NH_4^-$ ,  $K^-$ ,  $Na^-$ -モンモリロナイトの構造と膨潤挙動

モンモリロナイトは八面体の同形置換の割合により層電荷が 0.25~0.6 の範囲にある。本研究では層電荷の変化による膨潤挙動の変化を考察するため、0.33, 0.5, 0.67 の層電荷をもつモンモリロナイトについて層間イオンの違いによる膨潤挙動の変化を計算した。図 5.1.2 には  $NH_4^-$ -モンモリロナイト(層電荷 0.5)の一層膨潤状態のスナップショットを示す。この一層膨潤状態は、層間に挿入した  $H_2O$  の数(組成式当り)に対する混合エンタルピー( $\Delta H_{\text{mix}}$ )の変化の極小値(図 5.1.3) から判断した。ここで  $\Delta H_{\text{mix}}$  のゼロの基準はまだ確定でない。これは  $H_2O$  無しの結晶のエンタルピーがまだ最小値を得られていない可能性があるため、今後ゼロ基準を正確に求めるための計算を継続する。また  $NH_4^-$ -モンモリロナイトの  $H_2O$  無しでの底面間隔の計算値 (11.6 Å) が実験値 (10.4 Å[4]) と比べて大きく、今後モデルもしくは初期構造の検討をする必要がある。

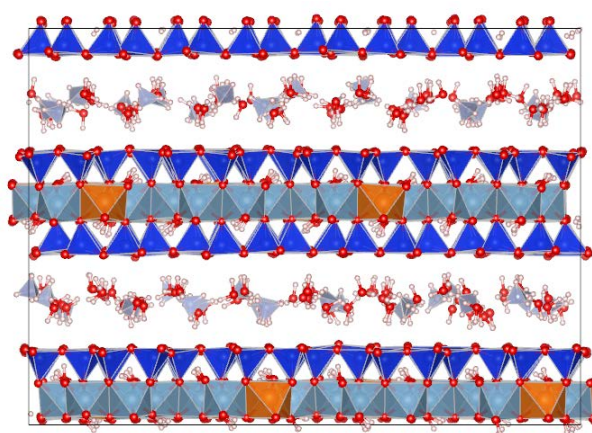


図 5.1.2  $NH_4^-$ -モンモリロナイトの一層膨潤状態の計算結果。

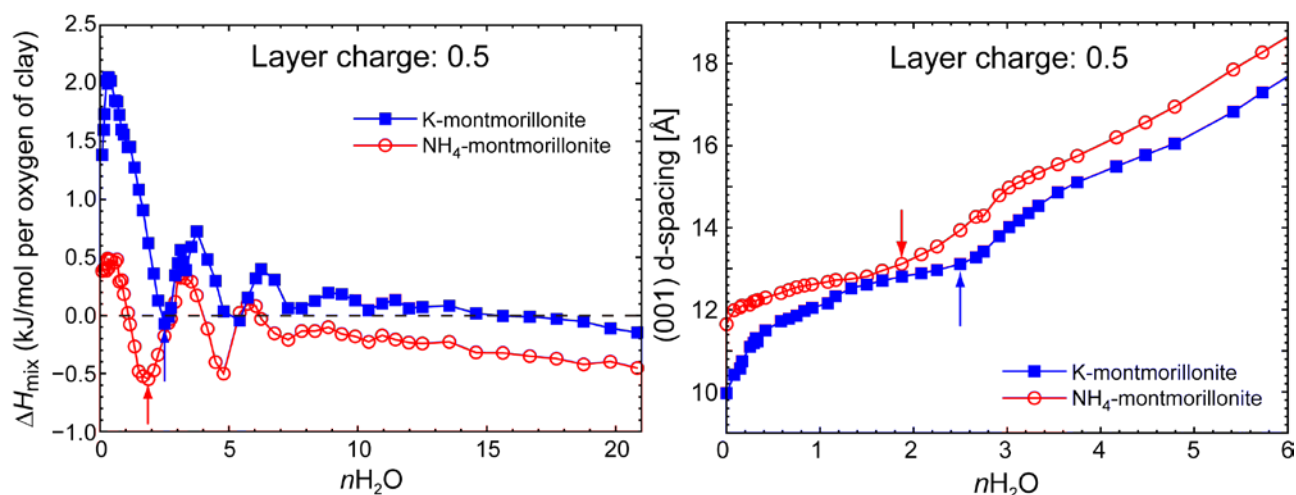


図 5.1.3 含水量に対する混合エンタルピーの変化(左)と底面間隔の変化(右)。混合エンタルピーから判断した一層膨潤に対応する、混合エンタルピー・底面間隔 ( $NH_4^-$ : 13.1 Å,  $K^-$ : 13.1Å) を矢印で示す。

NH<sub>4</sub>イオンモデルや NH<sub>4</sub>モンモリロナイトの初期構造に検討すべき課題はあるものの現時点で得られた知見として以下の2点を挙げる事ができる。

1. NH<sub>4</sub>イオンは H がモンモリロナイト表面の O と水素結合をするため、結合に方向性があり、安定配置が K<sup>+</sup>イオンとは異なる。

2. 混合エンタルピーの極小値が、K型と比較して少ない  $n\text{H}_2\text{O}$  にあるので、NH<sub>4</sub>型のモンモリロナイトは K型よりも低相対湿度で膨潤しやすい。

2の知見は湿度制御 X線回折の実験結果と調和的である。

#### 5. 1. 4 今後の課題

今年度は NH<sub>4</sub>イオンの原子間相互作用モデルの開発から取組み、層電荷 0.5 のモンモリロナイトについて、その膨潤挙動を MD 計算から評価した。今後は、水無しの NH<sub>4</sub>型モンモリロナイトの構造の検討および、NH<sub>4</sub>イオンモデルの改良を実施し、これらモンモリロナイトの膨潤挙動を原子スケールから理解することを目指す。

#### 5. 1. 5 参考文献

- 1) 河村雄行 (2008) 鉱物—水系の分子シミュレーション, *地球化学*, **42**, 115-132.
- 2) R.A. Nyquist and R.O. Kagel (1971) Infrared spectra of inorganic compounds (3800-45cm<sup>-1</sup>), Academic Press, New York, pp. 495.
- 3) Y. Marcus (1991) Thermodynamics of solvation of ions, *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, **87**, 2995-2999.
- 4) M. Gautier, F. Muller, L. Le Forestier, J.-M. Bény, R. Guégan (2010) NH<sub>4</sub>-smectite: Characterization, hydration properties and hydro mechanical behavior, *Appl. Clay Sci.*, **49**, 247-254.

## 6. 1 寄洲堆積物および津波堆積物における放射性セシウムの垂直分布

### 6. 1. 1 研究報告の概要

河川における放射性 Cs の動態解明の一端として、福島県西部から新潟市に流下し、日本海に注ぐ阿賀野川の下流域と阿武隈山地から福島県中通りの阿武隈川に合流する移川下流のダム付近から採取した寄洲堆積物について昨年を引き続いて検討した。

その結果、両地点とも寄洲堆積物における粘土含量当たりの放射性 Cs 濃度は原発事故直後に高く、その後は次第に低下する傾向であった。その傾向は河川を流下する微粒子を集めて排出される浄水場発生土の放射性 Cs 濃度の時間変化においても同様であった。即ち、阿賀野川下流域の阿賀野川浄水場と満願寺浄水場では、原発事故後早い時期の取水に由来する発生土で高い放射性 Cs 濃度が観測されたが、その後は低下し、高い値は観測されていない。また、砂サイズの黒雲母風化物には移川ダムの下層でのみ放射性 Cs が明らかに検出されたが、その他の層の黒雲母風化物には放射線の検出は極めてわずかであり、河川内で一旦粘土粒子等に保持された放射性 Cs が他の土壌粒子との間で均一化する度合いは少ないと見られた。

研究地点を変えて、宮城県沿岸部の津波堆積物とその下の残存土における放射性 Cs の垂直分布を県南部から亘理-山元、名取、仙台に渡って 17 地点で測定した。再表層の泥質堆積物の放射性 Cs 濃度が高く、残存土ではほとんど検出されない場合が多かった。原発事故地点に近い亘理-山元では名取、仙台より泥質堆積物の放射性 Cs 濃度が高い傾向であった。また、泥質堆積物の垂直断面における放射性物質の濃度は斑点状に高い場所と層状にごく薄く存在する部分があり、沈着した放射性セシウムの形態に 2 種類あることが示唆された。

### 6. 1. 2 実施報告の背景・目的

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震と大津波に続く東京電力福島第 1 原子力発電所の事故で多量の放射性物質が環境中に放出された。土壌環境中に降下した放射性物質の動態が広く計測されつつある。その中で、ここでは福島県西部から新潟県を横切って日本海に注ぐ阿賀野川と福島県阿武隈山地から流下し、阿武隈川に合流する移川において川岸にある寄洲堆積物中の放射性 Cs 濃度と同堆積物の性質との関係を検討している。これまでに、砂質な層より泥質な層の放射性 Cs 含量が多い傾向であり、粘土サイズの粒子が放射性 Cs を運搬する大きな役割をすること、土壌の放射性 Cs 含量を粘土含量で除し、粘土当たりの放射性 Cs 含量を試算すると、その値は 2011 年末頃までではあるが、概ね減少傾向であったこと、その一方、風化した砂サイズの雲母粒子の一部にも放射性 Cs が観測され、これもその運搬者になることがあること、移川ダム堆積物の粘土画分にはバーミキュライト、雲母粘土鉱物、カオリン鉱物が含まれるが、スメクタイトがほとんど含まれず、阿武隈山地の水田土壌と類似したこと、などが解明された。しかし、これらの結果の中で、砂画分中の黒雲母風化粒子における放射性 Cs 含量は寄洲堆積物の層によってどのように変化するか、また、粘土当たりの放射性 Cs 含量のピークはどの時期に流下堆積したものかとの課題が残った。

宮城県中南部においては津波が 4～5 km 内陸まで遡上した。その後放射性 Cs は降下したが、そのときの津波被災農地の津波堆積物は沈降後間もなく柔らかかったか、あるいは海水がまだあって、堆積物の一部はまだ懸濁状態であったかも知れない。宮城県では農地

の復旧を進める過程で津波堆積物を除去したが、津波堆積物中の放射性 Cs の分布がわかれば、その後の農地管理の参考になる。

そこで、今年度は昨年が続いて次の3つを目的とした。

- (1) 寄洲堆積物における粘土あたりの放射性 Cs 含量の垂直分布を、経時的に観測されている浄水場発生土の放射性 Cs 含量の経過と比較する。阿賀野川、移川の水位経過と寄洲堆積物における粘土あたりの放射性 Cs 含量のピークとの関係を検討する。
- (2) 移川の寄洲堆積物に含まれる砂画分の雲母風化物における放射性 Cs 含量の層別変化を検討する。
- (3) 宮城県沿岸部における津波堆積物における放射性 Cs の垂直分布を解明する。

### 6. 1. 3 試験方法

#### ・試料採取と調製

(1) 移川ダム (UGD) と阿賀野川下流横雲橋付近 (OUT) の寄洲堆積物における粘土あたりの放射性 Cs 含量は、風乾細土あたりの放射性 Cs 含量を粘土含量で割り算して算出した。寄洲堆積物の採取場所と方法は昨年の報告書と同じである。浄水場発生土の放射性 Cs 濃度については、新潟県阿賀野川浄水場と満願寺浄水場から経時的に公表された測定値を用いた。UGD, OUT 付近の水位の時間経過は国土交通省水文水質データベースに公表されている数値を用いた。

(2) 移川ダム寄洲堆積物の第2, 5, 7, 8層 (UGD2, UGD5, UGD7, UGD8) の2-0.2mmおよび0.2-0.05mmの画分から黒雲母風化粒子をビニールシート片に静電気で付着させ、それらを両面テープに取り、ボール紙に並べて貼った。第2 ( $820 \text{ Bq kg}^{-1}$ ), 5 ( $520 \text{ Bq kg}^{-1}$ )層は放射性 Cs 濃度の低い層、第7 ( $30000 \text{ Bq kg}^{-1}$ ), 8 ( $61000 \text{ Bq kg}^{-1}$ )層は放射性 Cs 濃度の高い層として選択した。そのボール紙を富士フィルム社製イメージングプレート、BAS-5000に2ヶ月間露光した。そして、放射性 Cs 濃度の高い粒子と低い粒子を5粒ずつ試料台に貼付け、カーボン蒸着後、走査電子顕微鏡 (SEM, HITACHI SU8000) に装備したエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDX) で K 含量を測定した。

(3) 宮城県の344地点において、2011年5月11日～19日にかけて津波被災農地の土壌調査と試料採取を行った。これらの土壌については、厚さ1cm以上ある場合には泥質堆積物と砂質堆積物に分けて採取し、その下の残土については0-10cm (第1層) と10-20cm (第2層) を採取した。これらのうち、泥質堆積物を持つ宮城県南部から中部までの地域から17地点を選択した。その風乾細土試料の放射性 Cs 含量を市販のU8容器に高さ12mmまで詰め、Ge半導体検出器で測定した。

泥質堆積物は乾燥により収縮し、固化した。この固化物の断片から、ニチカ社に依頼し、次のようにして垂直断片を作製した。コニシボンド社製超低粘度エポキシ樹脂 E205 を入れた容器に固形物断片を入れ、樹脂を染み込ませた。それを容器より取り出し、加熱して硬化させ、半分に切断した。切断面に樹脂を塗り、熱硬化させた。硬化後3mm厚に切断し、切断面に樹脂を塗り、熱硬化させた。硬化後一面をカーボランダム研磨粉にて#1000まで研磨した。このように作製した試料片を富士フィルム社製 BAS-5000 イメージングプレート (IP) に30日間露光した。

未処理の泥質津波堆積物断片の垂直断面に両面テープを押し付けて堆積物試料を両面テープの片面に取り、両面テープのもう一方を試料台に貼付けて、カーボン蒸着後、走査電

子顕微鏡 SEM による観察と EDX 分析を行った。

#### 6. 1. 4 実施研究の結果

(1) 寄洲堆積物における粘土あたりの放射性 Cs 含量の垂直分布と浄水場発生土の放射性 Cs 含量の経時変化及び河川の水位変化との関係

UGD と OUT における粘土含量当たりの放射性 Cs の垂直分布 (図 6. 1. 1) を見ると, 放射性 Cs を含む下層側で高い値を示したが, 上層側では大きく低下した。但し, 事故を起こした

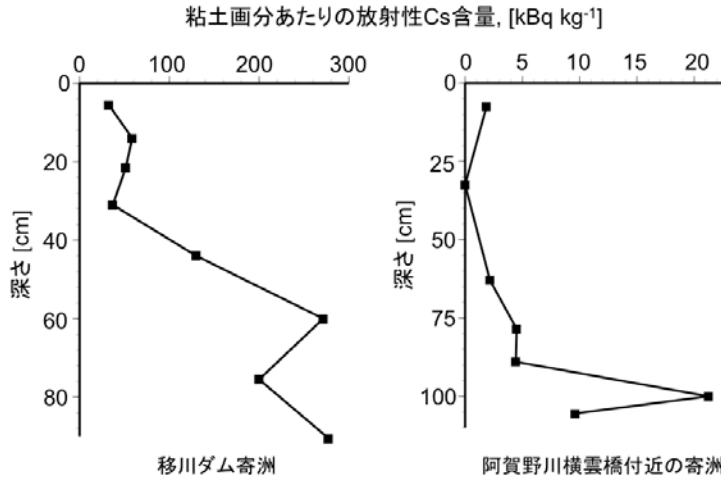


図 6. 1. 1 UGD (左) と OUT (右) における粘土含量当たりの放射性 Cs 含量の垂直分布

原発に近い UGD では上層でもその値は OUT よりも高いが, 変化の傾向は似ていた。寄洲堆積物の下側ほど堆積物の流下した時期が早く, 上側に行くにつれて時間が遅いと考えれば, 原発事故の初期に特に濃度が高く, その後は低下傾向であったと見られる。2011 年に阿賀野川浄水場で発生土に最大 35400 Bq kg<sup>-1</sup> の放射性 Cs が検出された。さらに, 他の浄水場でも発生土に含まれる放射性 Cs 濃度を公表している。その内, 阿賀野川関係について阿賀野川浄水場とそれより上流側にある満願寺浄水場の公表数値を図示した (図 6. 1. 2)。

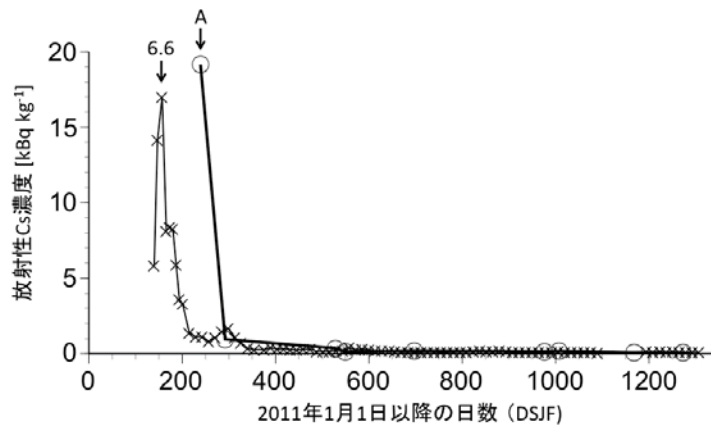


図6.1.2 2011年1月1日以降の阿賀野川浄水場 (○) および満願寺浄水場 (x) における発生土中の放射性Cs濃度の推移。「○」印のプロットは最大値と最小値の中間における値を示す。例えば, A点は阿賀野川浄水場で234から242DSJFに観測された2890と35400 Bq kg<sup>-1</sup>の中間である。図示した放射性Cs濃度を示す発生土は, 満願寺浄水場では45-60日, 阿賀野川浄水場では120-240前の取水に由来する。

図 6.1.2 によれば図 6.1.1 と同様に両浄水場発生土とも 2011 年の原発事故後に取水されたときの発生土の放射性 Cs 濃度が極めて高く、その後は大きく低下し、3 年以上を経過しても低下したままである。なお、阿賀野川浄水場では発生土を天日乾燥するため、発生土の出来上がる頻度が数ヶ月に 1 回程度である。これに対して満願寺浄水場は機械でしぼるため、発生土の排出間隔は数十日と短く、プロットの数も多い。図 6.1.1 の寄洲堆積物は 2011 年 12 月末に採取したもので、その時期までの最大増水時期が寄洲堆積物の最上位である。したがって、図 6.1.2 の 2 つの浄水場から出された発生土の測定結果は図 6.1.1 よりも長期間の経過を表現している。

次に、初期の高い放射性 Cs 濃度を記録した時期について、両河川の水位の経過から検討した。放射性 Cs 濃度の高い層は、UGD, OUT とともに両者を採取した 12 月末の水位よりも上だが、試料採取時の水位からの高さは 1m 以下であった。両河川の UGD, OUT に近い水位観測地点における水位経過を 2011 年 1 月 1 日から 500 日間に渡って図 6.1.3 と図 6.1.4 に示した。同水位測定は 1 時間に 1 回の頻度で行われており、1 日の内の最大値（日最大水位）を図示している。500 日間を図示したのは原発事故の起きた 2011 年 3 月中旬を含む前後の年周期を表現するためである。両地点の水位は冬の間は低く、3 月下旬頃から数十 cm 前後の高い水位が頻発するようになる。1m 程度以上の高い水位は年に数度以内と見られる。

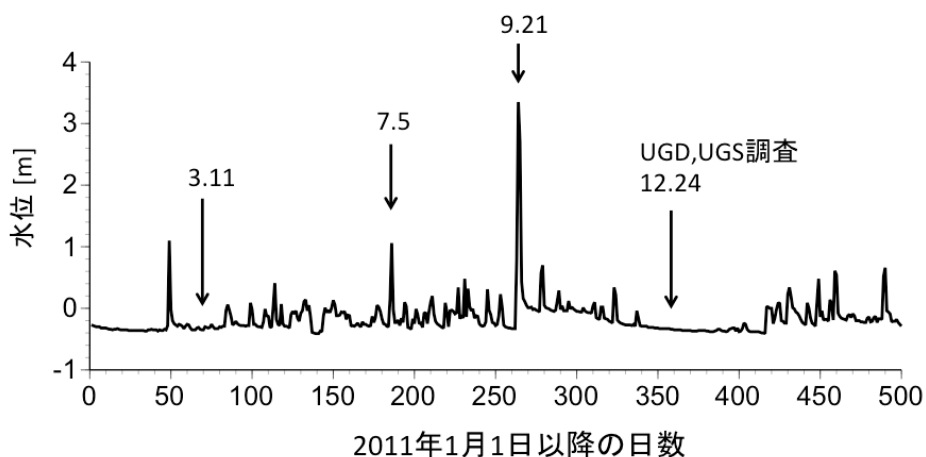


図 6.1.3 移川ダム寄洲堆積物採取地点 (UGD) 付近に置ける日最大水位の経過.

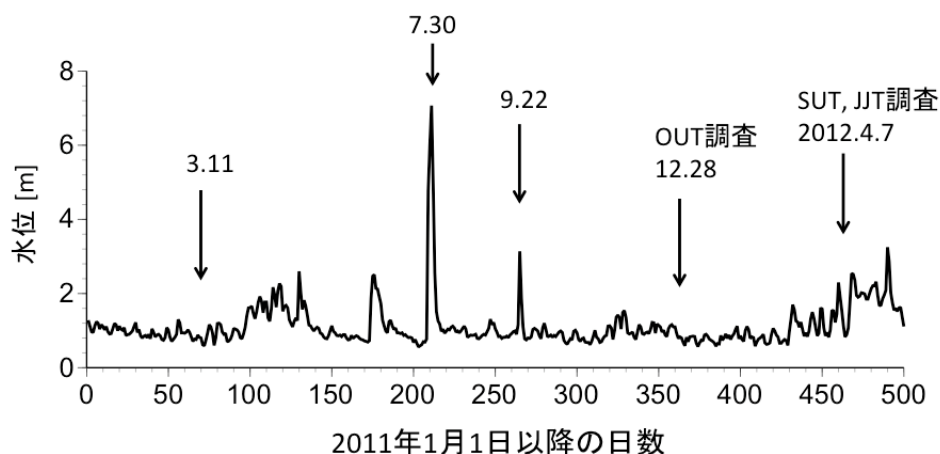


図 6.1.4 阿賀野川河口横雲橋近傍の寄洲堆積物 (OUT) 付近における日最大水位の経過.

3月下旬の水位上昇には雪解け水が含まれる可能性が高い。500日の間で春の水位上昇の時期は移川、阿賀野川とも2回繰り返されている。これが雪解け水であるとすれば、放射性Cs濃度の高い懸濁物は雪解け水に運ばれて流下した可能性が考えられる。逆に、3月下旬の増水前におけるこれらの河川の上流側には雪があったということで、これらの雪解け水に運ばれた放射性Csは雪の上、特に水の枯れた河底～河川敷きに降下したものが主である可能性もある。2011年3月下旬の水位上昇の時期は2012年の3月下旬にも認められたが、2012年には阿賀野川浄水場、満願寺浄水場両者の発生土とも放射性Csのピークは観測されていない。

2011年春の取水に由来する発生土の放射性Csの高いピーク(図6.1.2)以降も数値は低い。2012年以降よりわずかに高い値が観測されている。これらの値は雪解け水以後の雨による川底、一時的な洲、河川敷あるいはその周囲などから少しずつ移動した懸濁物に含まれていた放射性Csによる可能性が考えられる。

図6.1.2に類似した浄水場発生土における放射性Csの含量変化は埼玉県の数カ所からも報告され、そのうち1カ所では2年目の春にも放射性Cs含量のピークが観測されているが、そのピークは2011年の春よりは小さい。

## (2) 砂画分の黒雲母風化物に含まれる放射性Cs

放射性Csを含む砂サイズの風化黒雲母粒子はUGDにおいて第8層に検出された(図6.1.5)。この層は川底の砂礫層に至るまで数十cmの厚さであると見られたが、今回の試料の中では最下層である。図6.1.5の左は両面テープに貼付けた2-0.2mm(粗砂)と0.2-0.05mm(中砂)の画分から分離した風化黒雲母の写真である。その右はイメージングプレートに検出された放射性を帯びた粒子の位置である。第2, 5, 7層では粗砂、中砂とも放射線が全く出ていないということではないかも知れないが、ほとんど検出されなかった。これに対して、第8層では粗砂、中砂両者の画分に放射性を帯びた粒子が観測された。中砂の方は粒子が小さくて粒数が多いこともあるが、中砂の方が放射性を持つ粒子は多かった。

イメージングプレートへの露光時間が2ヶ月と長かったので天然の放射性 $^{40}\text{K}$ の影響があるかもしれないと考え、粗砂の放射性粒子5個と非放射性粒子5個を選択して、SEM-EDXによる $\text{K}_2\text{O}$ 含量を比較した。放射性粒子と非放射性的の粒子の $\text{K}_2\text{O}$ 含量はそれぞれ4.5~25(平均15), 3~54(平均25)  $\text{Bq kg}^{-1}$ と変動が大きい。どちらかのグループで $\text{K}_2\text{O}$ 含量が多くなる偏りはなく、5%水準で有意差はなかった。図6.1.5右でイメージングプレートに検出された放射能は $^{40}\text{K}$ によるものではない。また、風乾細土試料のものだがガンマ線スペクトルを見ると $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ のピークに比べて $^{210}\text{Pb}$ のピークも明らかではなかった。したがって、図6.1.5の第8層の雲母風化物に検出された放射線のスポットは放射性Csによる可能性は高い。さらに粗砂サイズの雲母風化物の元素組成はK以外にも変動があり、いくつかの粒子は黒雲母から期待されるよりAl濃度が高く、Mg濃度が低い粒子も認められた。黒雲母は加水黒雲母、バーミキュライトやカオリン鉱物などに風化しやすく、第8層の雲母風化物にも砂サイズながらケイ酸塩層にも風化が強く進んだものが見られる。

図6.1.5によれば、粘土画分中の放射性Cs濃度は高いにも係わらず、第8層の中においても砂サイズの雲母風化物には放射性Cs濃度の大きく異なる粒子が混在する。同雲母風化物のK濃度範囲から見て、放射性Cs濃度の含量と黒雲母の風化度とは関係がないように見

られる。即ち、粘土から砂サイズ黒雲母風化物への放射性 Cs の移行、砂サイズ黒雲母風化物間での放射性 Cs の均一化は、河川水の中または堆積物中、さらには試料調製中にはほとんど進まないように見える。

第7層の粘土画分の放射性 Cs 濃度は図 6.1.1 左のように高い値である。それにも係わらず、砂サイズの放射性 Cs を含む雲母風化物の頻度は極めて低い。したがって、粘土画分の放射性 Cs は砂サイズの黒雲母風化物にはほとんど移らないように見える。

このような状況を考えると、第8層中で放射性 Cs 濃度の高い黒雲母風化物が存在する理由を考察する必要がある。一つの可能性を推察すると、水のない川底～河川敷の表面にあった黒雲母風化物に直接放射性 Cs が沈着したか、その上にあった雪に放射性 Cs が沈着した後、雪解け水に溶解した放射性 Cs が直接黒雲母風化物に保持され、それらが雪解け水と一緒に懸濁状態で流下し、寄洲堆積物となったかも知れない (Nanzyo *et al.*, 2014)。

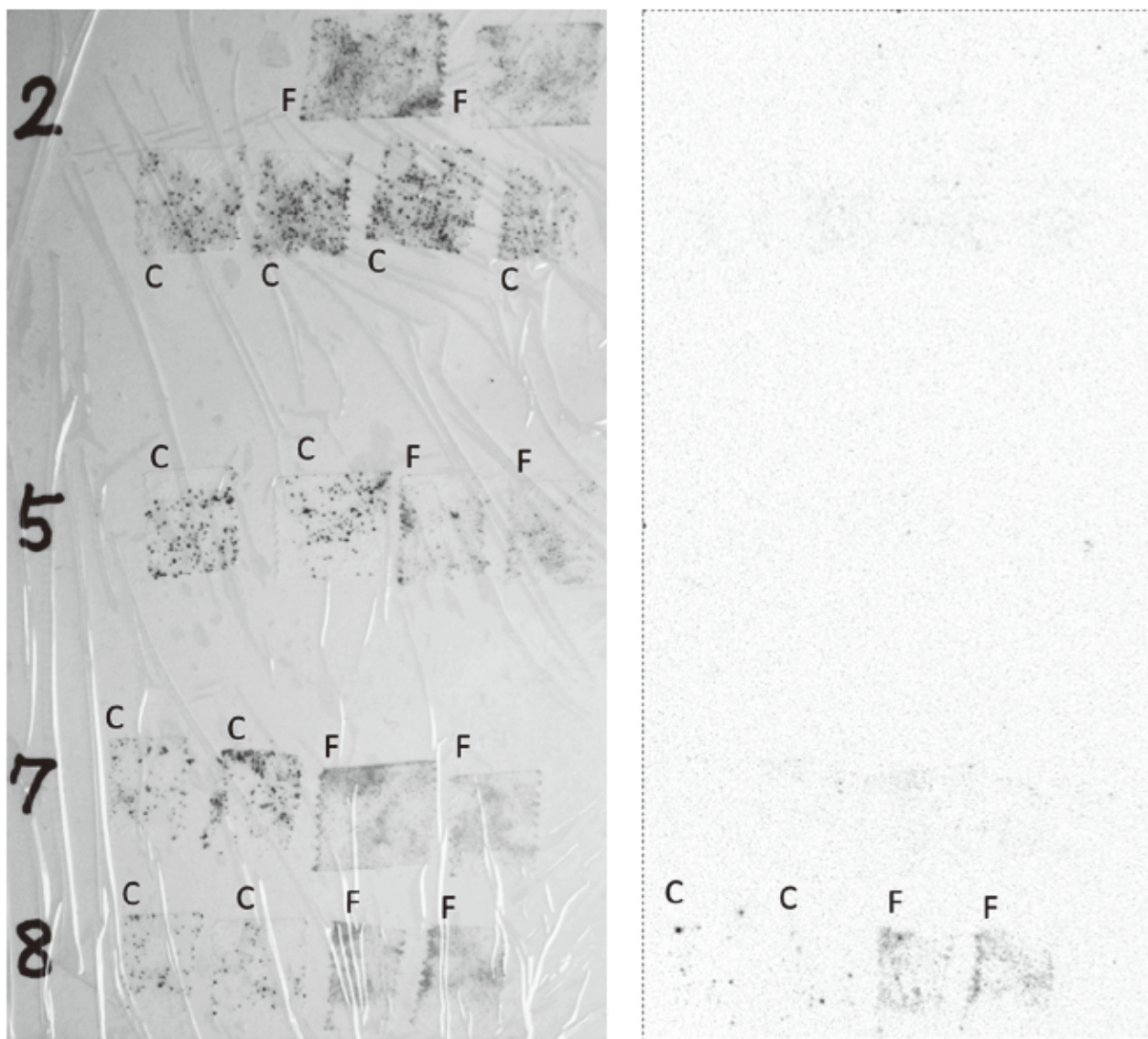


図 6.1.5 UGD における風乾細土 (左) 中および粘土あたりの放射性 Cs 濃度 (右)。左端にある手書きの数字は上から付けた層の番号を示す。C: 2~0.2mm 画分, F: 0.2~0.05mm 画分。

(3) 宮城県の津波被災地における放射性 Cs の垂直分布

泥質堆積物-砂質堆積物-第 I 層-第 II 層と区分して採取した試料中の放射性 Cs 含量を原発事故地点からの距離が遠い方から仙台, 名取, 亶理-山元と 3 つに区分して垂直分布を図示すると図 6.1.6 のようになった。どの地点も泥質堆積物堆積物で最も高い濃度で, 第 I, II 層にはほとんど含まれていなかった。泥質堆積物中の濃度を地域別に比較すると亶理-山元よりも名取, 仙台では濃度が低い傾向であった。亶理-山元は原発事故地点に近いと見られる。試料は堆積物の層として採取したため, その値には層の厚さも関係し得る。しかし, 今回測定した 17 試料ではいずれも  $8000 \text{ Bq kg}^{-1}$  を超える値には至らなかった。宮城県では津波堆積物を除去後, 除塩をし, さらに必要に応じて客土しているので農地内部の放射性 Cs の多くは除去された可能性が高い。

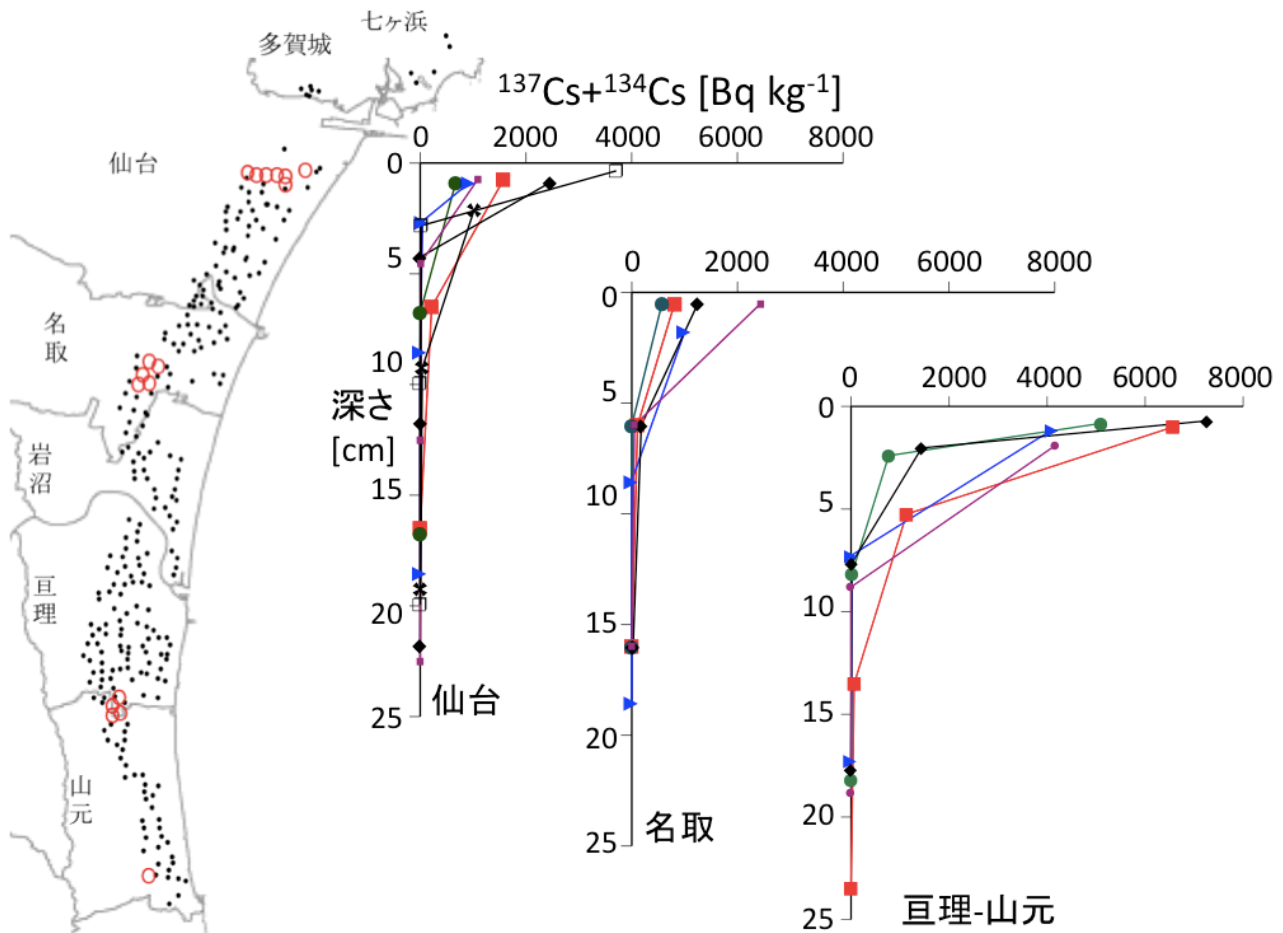


図 6.1.6 津波堆積物及び残土中の放射性 Cs 含量の垂直分布。左端の地図の細かい点は土壌試料の採取地点を示し, その内の○印は放射性 Cs の垂直分布を測定した地点を示す。

泥質津波堆積物断片から IP に強く検出された放射線の大部分を放射性 Cs (2011 年 3 月の原発事故により放出された  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$ ) によるものと見なした。放射性 Cs の強く検出された部分の多くは同堆積物断片の表面付近に斑点状に分布した。この分布パターンは土壌表面では水平方向に斑点状に分布するとの測定結果 (中西 2013) から予想される状況である。さらに詳細に見ると図 1 (1) では 1 点だけ強い箇所がある中で表面付近は弱く全体

的に放射線が出ているように見られる。また、図 1 (2) では表面よりも明らかに数 mm 下にも放射線の強い箇所が斑点状に認められる。これは土の懸濁液状態の所に放射性 Cs が沈着した後に懸濁物が乾燥したためか、柔らかい堆積物の上に沈着した放射性 Cs を含む泥質物の表面が風などの力を受けてわずかに動かされたなどの可能性が考えられる。試料断片の側面に検出された斑点 (図の(1)) は断片作製時までの過程で表面付近の破片が付着した可能性もあり得る。

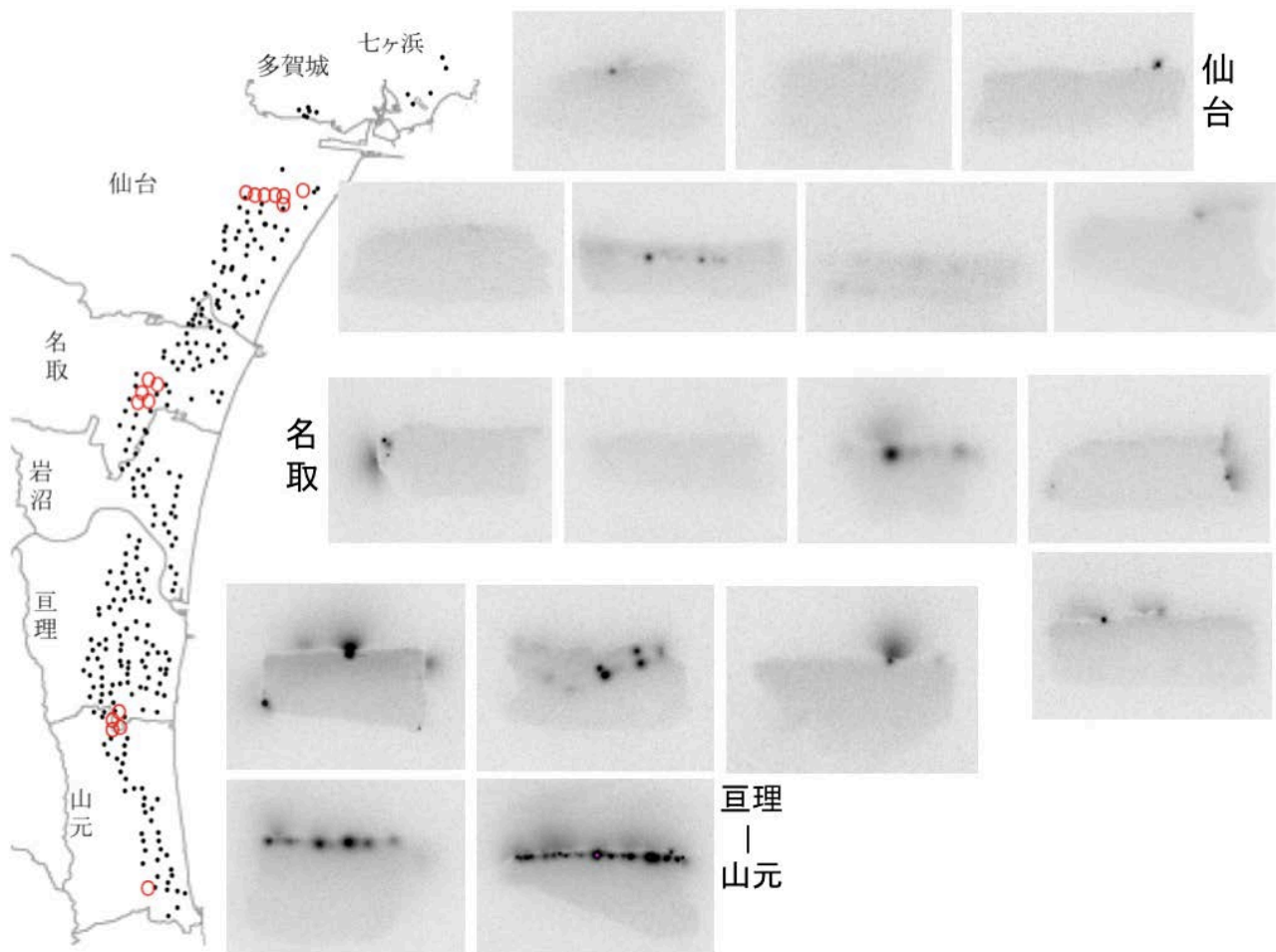
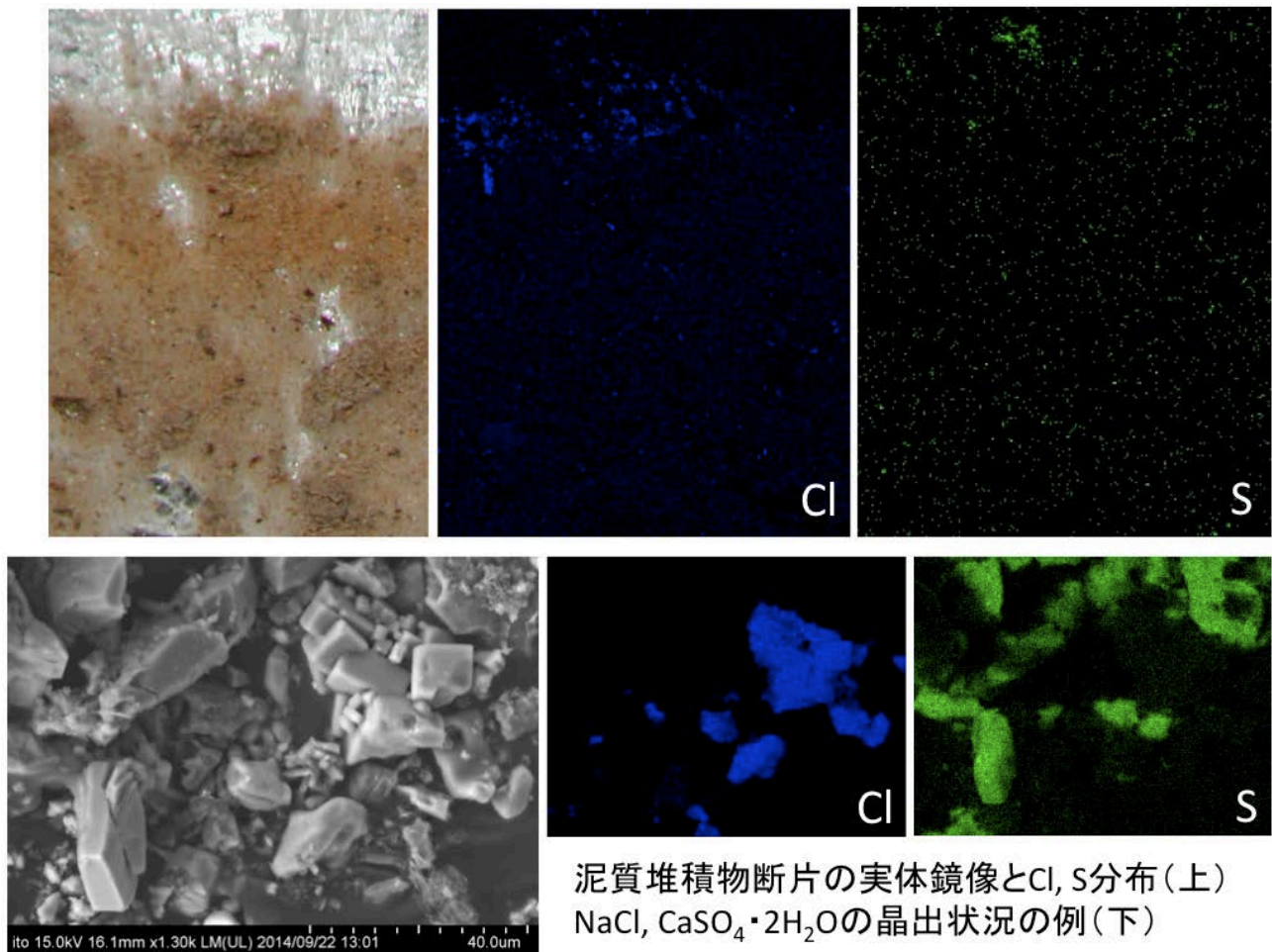


図 6.1.7 泥質津波堆積物中の放射性 Cs の垂直分布

SEM-EDX の結果から泥質堆積物の表面付近には  $\text{NaCl}$  や  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  などの塩類の晶出が認められた。堆積物によっては  $\text{NaCl}$  が多いもの、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  が多いものなど多様であった。これらの塩類は試料採取時までの約 2 ヶ月間に、降雨時には下層へ溶脱し、残った部分は乾燥に伴って堆積物の表面付近に濃縮されたと見られた (南條 2013)。これに対して、斑点状に存在する放射性 Cs, 層状に薄く存在する放射性 Cs の垂直分布はこれらの塩類の動きに大きな影響を受けていないように見られた。斑点状に放射線が強く出ている場所には放射性 Cs 濃度の高い粒子の存在 (Adachi *et al.*, 2013) の存在も考えられ得る。



泥質堆積物断片の実体鏡像とCl, S分布(上)  
NaCl, CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>Oの晶出状況の例(下)

図 6. 1. 8 泥質津波堆積物断片の表面付近における NaCl, CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O の晶出.

#### 6. 1. 5 実施研究のまとめ

阿賀野川下流域と移川下流のダム付近寄洲堆積物における放射性 Cs について昨年引き続き、検討を進めた。両地点とも寄洲堆積物における粘土含量当たりの放射性 Cs 濃度は原発事故直後と見られる時期に高く、その後は次第に低下する傾向であった。その傾向は河川を流下する微粒子を集めて排出される浄水場発生土の放射性 Cs 濃度の時間変化にも認められた。阿賀野川下流域の阿賀野川浄水場と満願寺浄水場では、原発事故後早い時期の取水に由来する発生土で高い濃度が観測されたが、その後は低下し、高い値は観測されていない。また、砂サイズの黒雲母風化物には移川ダムの下層でのみ放射性 Cs が明らかに検出されたが、その他の層の放射性の検出は極めてわずかで、一旦粘土粒子等に保持された放射性 Cs が河川内の他の土壌粒子との間で均一化する度合いは小さいと見られた。そして、放射性 Cs 濃度の高い黒雲母風化物には大気からの直接沈着したか、または雪の上に沈着したものが直接黒雲母風化物と接触したのではないかと推察された。

宮城県沿岸部の津波堆積物とその下の残存土における放射性 Cs の垂直分布を県南ぶから亘理-山元、名取、仙台に渡って 17 地点で測定した。再表層の泥質堆積物の放射性 Cs 濃度が高く、残存土ではほとんど検出されない場合が多かった。原発事故地点に近い亘理

-山元では名取，仙台より泥質堆積物の放射性 Cs 濃度が高い傾向であった。また，泥質堆積物の垂直断面における放射性物質の濃度は斑点状に高い場所と層状にごく薄く存在する部分があり，沈着した放射性セシウムの形態に 2 種類あることが示唆された。

#### 6. 1. 6 今後の課題

泥質津波堆積物に含まれる放射性 Cs の形態として，微粒子として沈着した見られるものと薄く層状に分布するものと少なくとも 2 種類あることについて，水平分布等を検討しながら確認を進める必要がある。また，微粒子として沈着したと見られるものが土壌からどの程度濃縮分離できるものかどうか，その結果が除染で出る放射性物質濃度の高い土壌の減容化にどの程度寄与できるかどうか推測する。

#### 6. 1. 7 参考文献

- 1) Adachi, K., Kajino, M., Zaizen, Y. and Igarashi, Y., Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident. *Sci. Rep.* 3, 2554 (2013).
- 2) 中西友子(2013) 土壌汚染 フクシマの放射性物質のゆくえ、NHK ブックス[1208]
- 3) 南條正巳，農地における塩害の概況とその修復，日本農学会編、シリーズ 21 世紀の農学，東日本大震災からの農林水産業と地域社会の復興，養賢堂， p.1-19 (2013)
- 4) Nanzyo, M., H. Kanno, and A. Takeda, Vertical distribution of radiocesium in side bar deposits of the Utsushi and Agano rivers, *Japan, Clay Science*, 18[2], 43-52 (2014)

## 6.2 汚染ため池堆積物の特徴の検討

### 6.2.1 研究報告の概要

福島県飯舘村において調査を行っている7箇所のため池のうち、ため池2(外内)について、深さ方向の分面試料における粒度分布測定および薄片試料を作成の上堆積物の状態についての検討を行うとともに、ため池4箇所においてため池内の放射性Cs濃度分布について調べた。

ため池2の試料については、昨年度の放射性Cs濃度の測定において深度が深くなるにつれ放射性Cs濃度が低くなることから、粒子サイズの影響があると推測したが、各深度における粒度分布測定の結果からは、粒子サイズの影響は見られないことが明らかとなった。このことから放射性Cs濃度は深度が深くなるにつれ低くなることについての現象解明として、粒子サイズの密度も含めた検討を行なう必要性が示唆された。

またため池2だけでなく、飯舘村役場周辺の7箇所でのため池堆積物の粒度分布を測定した結果、どのため池においても数 $\mu\text{m}$ 以下の粒子は検出されておらず、飯舘村役場周辺のため池における流速は比較的早く数 $\mu\text{m}$ 以下の粒子は、ため池内に沈降せず下流域に流れ出している可能性が高いと思われる結果が得られた。

ため池2において最表面(0-1cm)の試料において、底土の試料を薄片にし、走査型電子顕微鏡にて観察を行った結果、堆積物の粒子はサブミクロンサイズの粒子も含め、珪藻などの微生物とともに数十 $\mu\text{m}$ サイズの複合体粒子を形成していた。このことから2 $\mu\text{m}$ 以下の粘土粒子にCsが吸着されており、それらの集合体によって形成された数十 $\mu\text{m}$ 程度の粒子において、放射性Csが捕らえられている可能性があることが明らかとなった。

そして、ため池におけるパッシブ除染効果を検討する上で必要な放射性Csのトラップ能力を評価するため、4箇所のため池において放射性Cs濃度分布図の作成を行った。流入口あるいは流出口において放射線量は高いと予測推測されていたが、結果としては必ずしもそのような結果とはなっていないことが明らかとなった。

### 6.2.2 研究報告の背景・目的

福島第一原子力発電所の事故以降、福島県内における土壌・河川水・河川堆積物・ダム堆積物中の放射性Csに関する調査が行われている<sup>1-3)</sup>。調査結果によると、本宮市のため池の底土では37万Bq/kg、浪江町の大柿ダムの周辺土壌では34万Bq/kgと高濃度な放射性セシウムが検出されている<sup>4,5)</sup>。ため池では、降雨により周辺の周水域から放射性セシウムを含む土壌が流れ込み、ため池の底に堆積した結果、底土の放射性セシウム濃度が高いことが示されている<sup>3)</sup>(図6.2.1)。ため池には水が貯められていることから、水による遮蔽効果により地表での放射線の線量は高くない。しかしため池の底に溜められた底土が、ため池の下流域である水田や畑に流出する可能性もあり、さらなる放射能汚染を引き起こす可能性もある。福島県において、主たる産業が農業である地域においては、農業用水用のため池が数多く存在しているため、H26年度から試験的なため池の除染も開始されている。ため池における底土の放射性セシウムの実態把握は、除染の方法を検討する上で重要なデータとなる。

その一方でため池は、周辺から放射性セシウムを含む土壌が流れ込み、堆積・集積することから、人工的に造られた池ではあるものの、農業用人工池を利用した放射性セシウム回収システムとみなすこともできる。ため池の底に堆積した高濃度のCsを含む底土を下流域に影響なくかつ効率的に回収することができれば、減容化に繋げることができる。

そこで本研究では、福島県飯舘村のため池底土において除染を行なうにあたって必要なデータとして、放射性セシウムの深度方向の分布状況を調査するとともに、堆積物の粒度や形態について調べるとともに、その指針示すことを目的とする。また、ため池を巨大なCsトラップ場と捉え、ため池内でのCsの分布や、流れ込んでくるCsの状況についての検討を開始する。

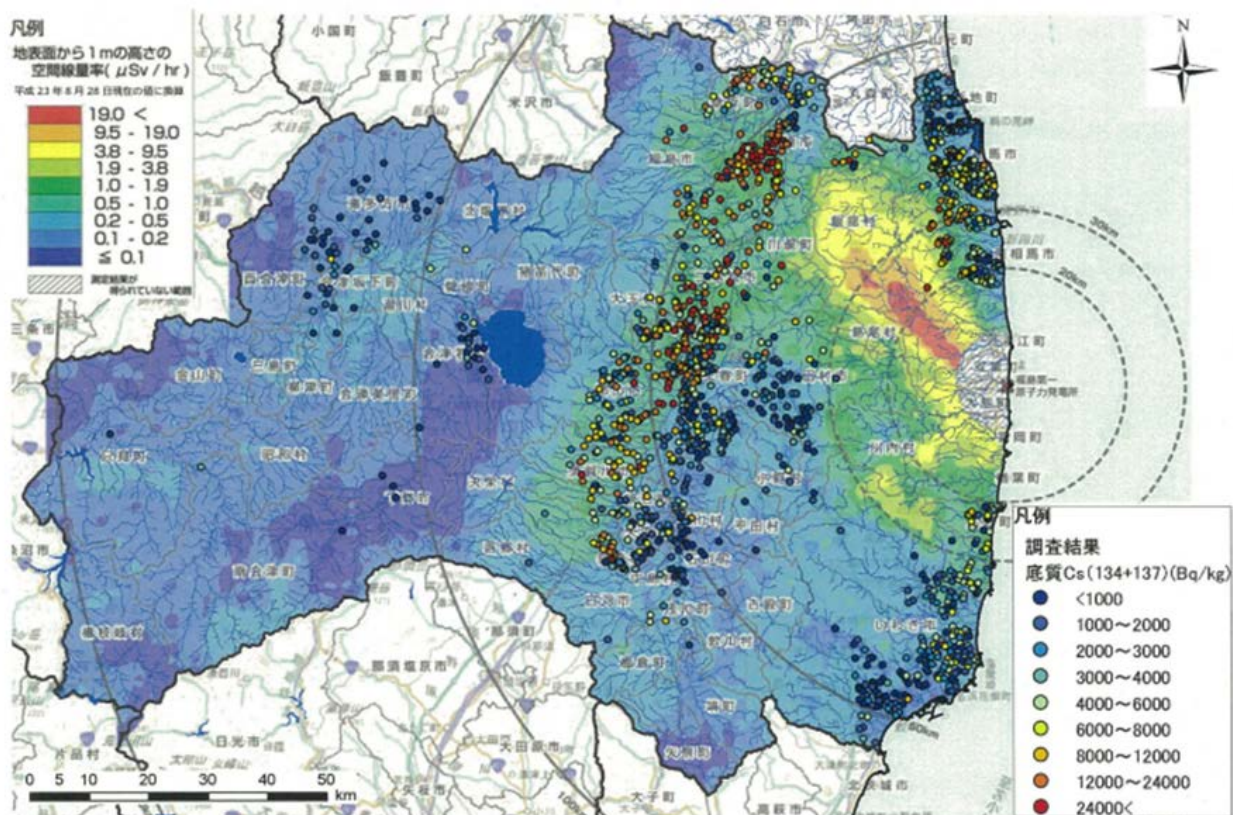


図 6.2.1 底質 Cs(134+137)濃度と空間線量率との関係<sup>5)</sup>

### 6.2.3 試験方法

ため池調査は、福島県相馬郡飯舘村の村役場周辺の7つの地点にて行っている(図6.2.2)。7つの地点の地名と場所は、ため池1(野沢:N37°40'49", E140°45'1"), ため池2(外内:N37°40'11", E140°43'24"), ため池3(白坂:N37°41'9", E140°42'10"), ため池4(市沢:N37°41'46", E140°42'52"), ため池5(大宮作:N37°42'4", E140°44'50"), ため池6(股田川:N37°42'50", E140°46'16"), ため池7(大火第1:N37°40'28", E140°42'14")である。

粒度分布および堆積物の分析には、ため池2(外内)の試料を用いた。この試料は、昨年度採取したコアの分析において、深度が深くなるにつれ放射性Cs濃度が低くなる傾向を示したものである。粒度分布測定に使用したコアの試料は、1cmごとにカットさ

れた試料を用いた。粒度分布測定は、粒子解析装置(株式会社堀場製作所製:LA960 装置)を用いて行った。また表層から 1cm までの試料について、泥試料を薄片にした後、走査型電子顕微鏡(日本電子株式会社製:JSM6610LA)にて観察を行った。

そしてため池 2(外内),ため池 4(市沢),ため池 5(大宮作),ため池 6(股田川)において、放射性 Cs 濃度の分布図を作成した。ため池にボートを浮かべ、ボート上から水中線量計(株式会社ジオファイブ社製:フィールドサーベイメーターSSM-1)を池底に沈め、Cs 濃度の測定を行った。位置情報についてはボート上にて GPS で測定を行った。



図 6.2.2 ため池調査地点

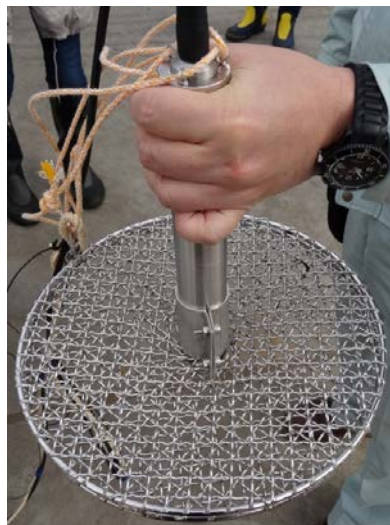


図 6.2.3 水中線量計の写真

## 6.2.4 実施研究の結果

### 6.2.4.1 ため池試料における深さ方向の粒度分布測定

ため池 2 の試料における粒度分布測定について、深さ 0 - 1cm, 4 - 5cm, 8 - 9cm の 3 試料の結果を図 6.2.4 に示す。いずれの粒度分布測定結果においても、数  $\mu\text{m}$  以下のサイズの粒子が見られないこと、またそれぞれの結果を比較して、深さ方向での粒子サイズの変化が目に見えて違いがないことが明らかとなった。

また参考として昨年度測定したため池 2 の試料の放射性 Cs 線量の深さ方向の結果を図 6.2.5 に示す。このデータから深度が深くなるにつれて放射性 Cs 濃度が低くなることから、池底面に近いほど微粒子が多くなることを予測していたが、粒度分布測定の結果からは、粒度分布において明らかな違いが認められる結果は得られなかった。今後としては、粒子サイズだけでなく粒子の密度も含めた検討を行う必要があることが示唆された。

そしてため池底土試料における堆積物の状態を調べるため、深さ 0 - 1cm の試料における泥土を薄片にし、走査型電子顕微鏡での観察を行った。観察した際の写真を図 6.2.6 に示す。堆積物の粒子はサブミクロンサイズの粒子も含め、珪藻などの微生物とともに数十  $\mu\text{m}$  サイズの粒子を形成していることが明らかとなった。

数  $\mu\text{m}$  以下のサイズの粒子が見られないことについては、ため池 2 の試料だけでなく、他のため池においても共通して見られることであり、飯舘村役場周辺のため池においては、ため池内での流れが比較的速く、数  $\mu\text{m}$  以下の微粒子はため池内に沈降せず、そのまま下流域に流れているものと推測される。

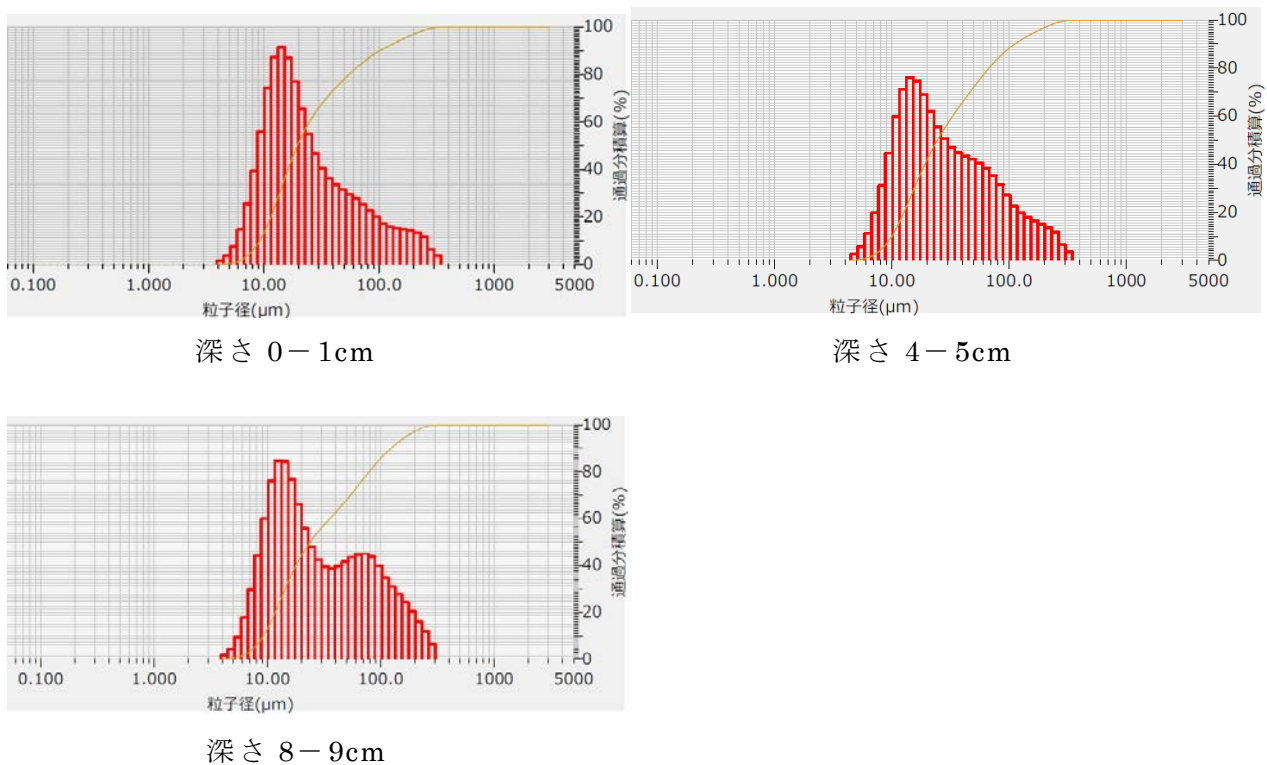
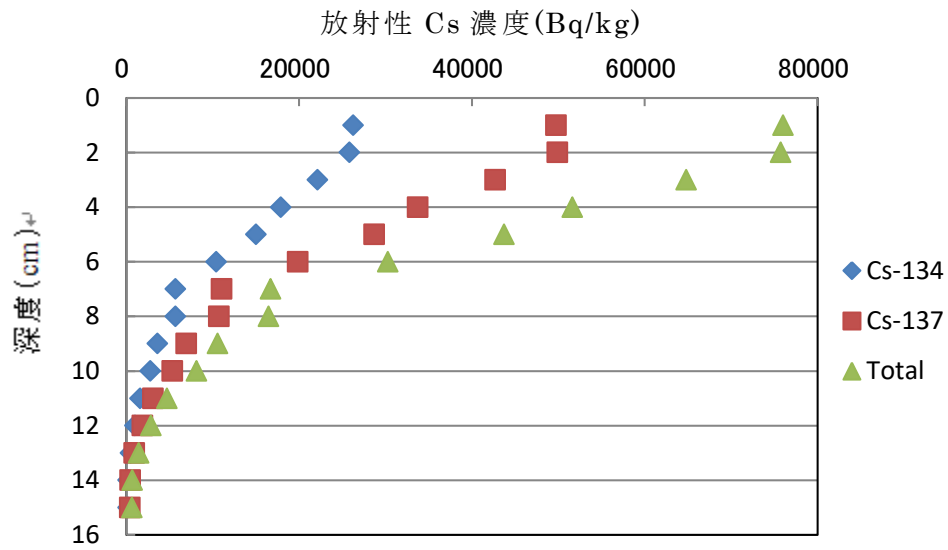


図 6.2.4 ため池 2 の試料における粒度分布測定結果



ため池2-2(採取時H25年3月)

図 6.2.5 ため池 2 における  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  および合計の放射性 Cs 濃度(H25 年 3 月採取)

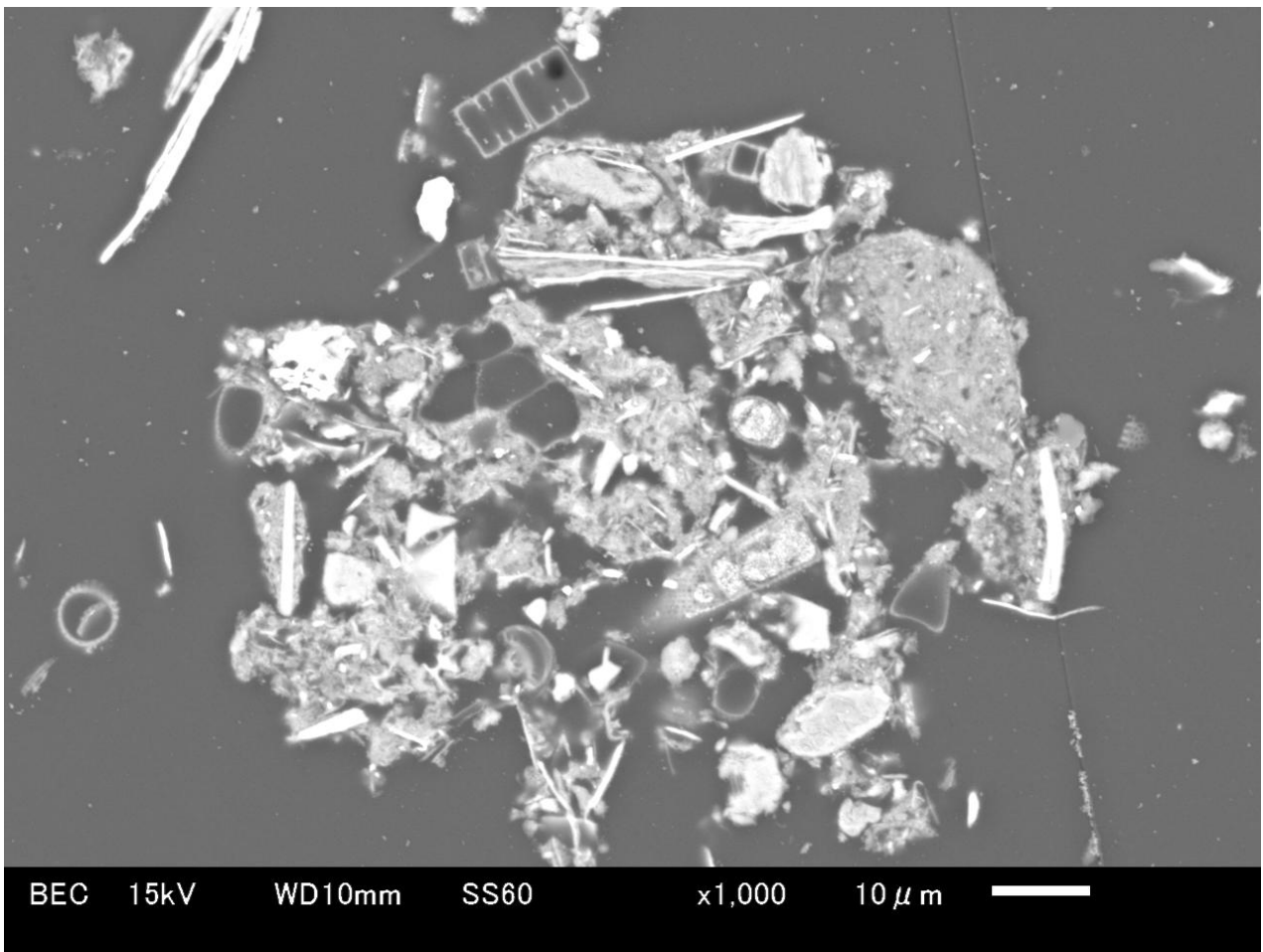


図 6.2.6 ため池堆積物の走査型顕微鏡写真

#### 6.2.4.2 ため池における放射性 Cs 濃度分布測定

ため池における放射性 Cs 濃度分布を把握するため、水中線量計を用いて測定したため池 2, 4, 5, 6 において測定した放射性 Cs 濃度分布を以下に示す(図 6.2.7(a)~(d))。

ため池 2 においては、流入口およびオーバーフローの箇所において放射性 Cs 濃度が高い地点が確認された。3 箇所あるどの流入口においても放射性 Cs 濃度が高いわけではなく、1 箇所のみ高い値が測定されていた。このため池 2 の測定結果は、H26 年 7 月に測定されたものであるが、H26 年冬に除染作業が行われているため、今後の放射性 Cs 濃度を継続的に行うことによって、流入域から流れ込む Cs を含む土壌についての見解が得られる可能性がある。

ため池 4, 5 においては、流入口や流出口でない、どちらかというとも池の中央部に付近にて放射性 Cs 濃度が高いところが見られた。このあたりについては、濃度測定を行った地点だけでなく、深さ情報も合わせて測定を行い、放射性 Cs 濃度の高い地点となる傾向を探っていくことを行う。

ため池 6 においては、流入口のみ放射性 Cs の高い地点が見られた。

上記のように各ため池において、放射性 Cs の濃度分布は様々な形が見られるため、それらの要因解明に向けた検討が必要であることが明らかとなった。

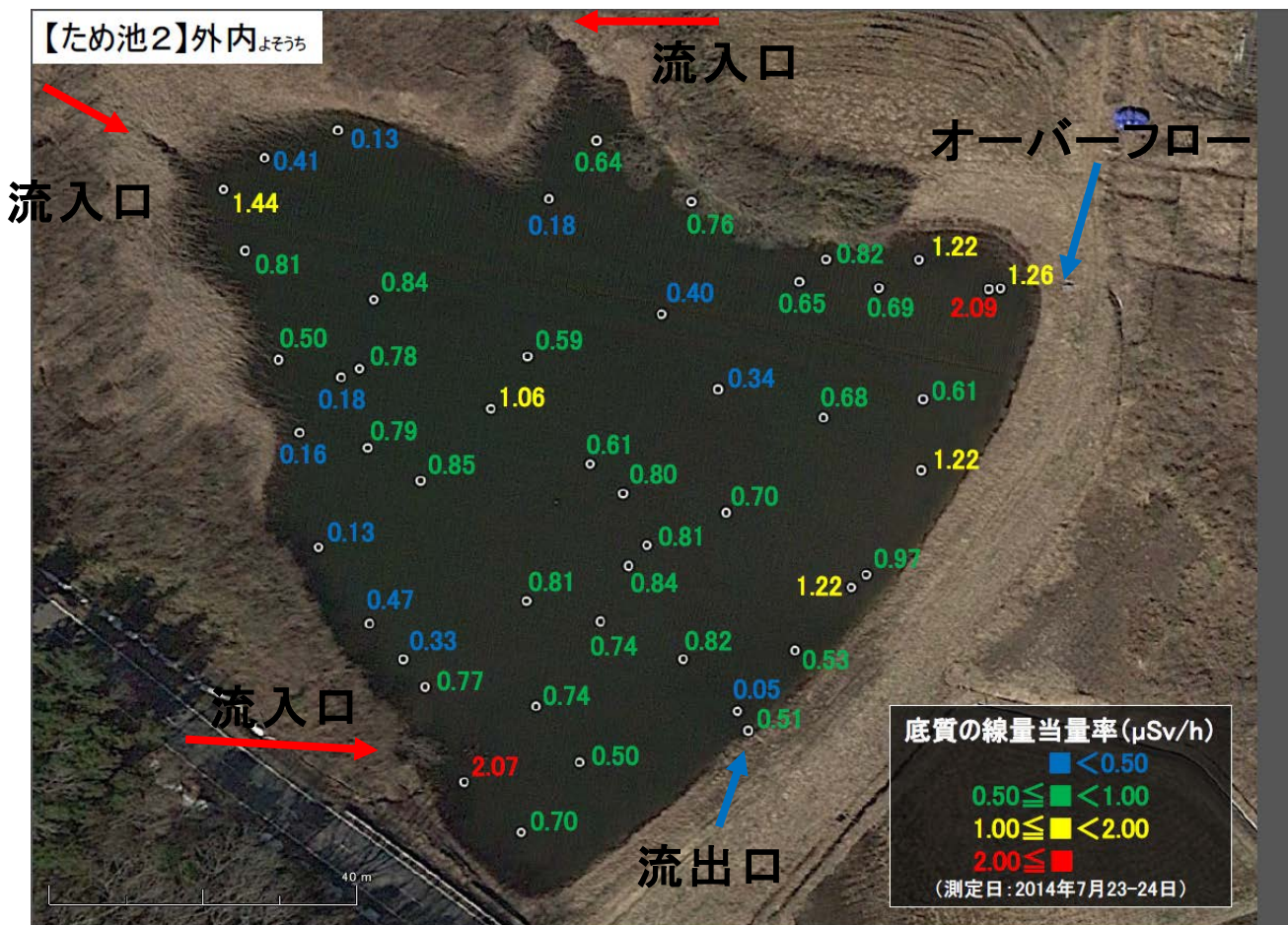


図 6.2.7(a) ため池 2(外内)における放射性 Cs 濃度分布図

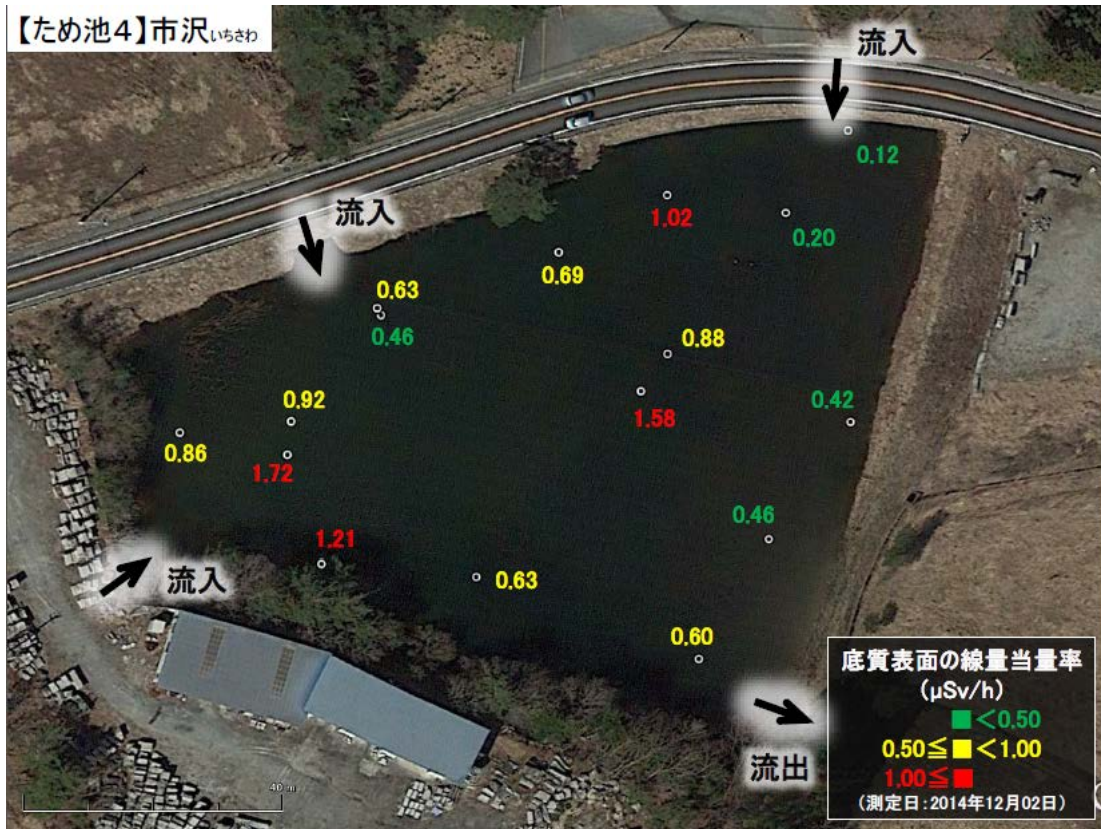


図 6.2.7(b) ため池 4(市沢)における放射性 Cs 濃度分布図

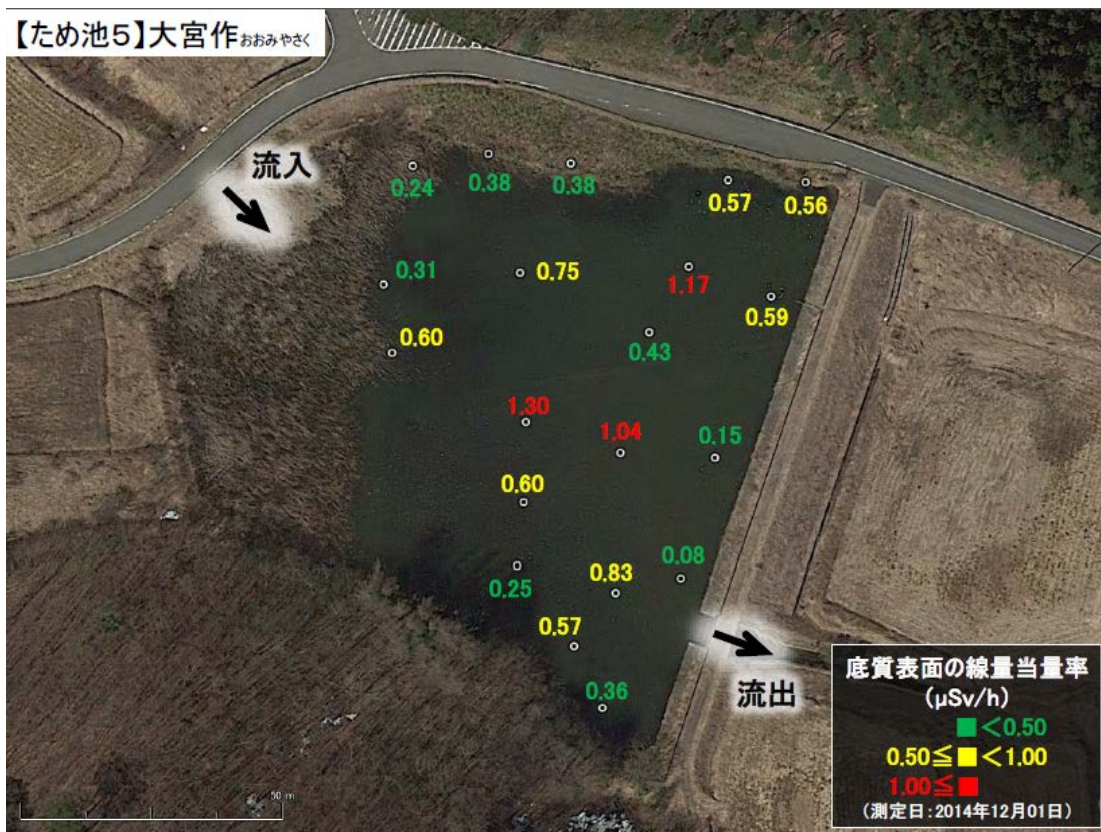


図 6.2.7(c) ため池 5(大宮作)における放射性 Cs 濃度分布図



図 6.2.7(d) ため池 6(股田川)における放射性 Cs 濃度分布図

### 6.2.5 実施研究のまとめ

福島県飯舘村において調査を行っている 7 箇所のため池のうち、ため池 2(外内)について、深さ方向の分画試料における粒度分布測定および薄片試料を作成の上堆積物の状態についての検討を行うとともに、ため池 4 箇所においてため池内の放射性 Cs 濃度分布について調べた。

ため池 2 の試料について、各深度における粒度分布測定の結果からは、深度方向に従って粒子サイズが大きくなるなどの粒子サイズの影響は見られなかった。またため池 2 だけでなく、飯舘村役場周辺の 7 箇所でのため池堆積物の粒度分布を測定した結果、どのため池においても数  $\mu\text{m}$  以下の粒子は検出されておらず、飯舘村役場周辺のため池における流速は比較的早く数  $\mu\text{m}$  以下の粒子は、ため池内に沈降せずに下流域に流れ出している可能性が高いと思われる結果が得られた。

さらにため池 2 において最表面(0-1cm)の試料において、底土の試料を薄片にし、走査型電子顕微鏡にて観察を行った結果、堆積物の粒子はサブミクロンサイズの粒子も含め、珪藻などの微生物とともに数十  $\mu\text{m}$  サイズの複合体粒子を形成していた。このことから 2  $\mu\text{m}$  以下の粘土粒子に Cs が吸着されており、それらの集合体によって形成された数十  $\mu\text{m}$  程度の粒子において、放射性 Cs が捕らえられている可能性があることが明らかとなった。

そして、ため池におけるパッシブ除染効果を検討する上で必要な放射性 Cs のトラップ能力を評価するため、4 箇所のため池において放射性 Cs 濃度分布図の作成を行った。

結果として、流入口あるいは流出口において放射線量は必ずしも高いわけではないことが明らかとなった。

#### 6.2.6 今後の課題

ため池の底土における堆積状況において、深度が深くなるにつれて放射性 Cs 濃度が低くなる現象の解明が求められる。また堆積状況の把握と存在形態の把握により、適切なため池の除染方法等についての提言を行う必要がある。

またため池における放射性 Cs 濃度分布の継続的な測定から、集水域の把握および、ため池に移行する放射性 Cs 量の把握などについての把握を行う必要がある。

#### 6.2.7 参考文献

- 1) 伊藤健一，宮原英隆，氏家亨，武島俊達，横山信吾，中田弘太郎，永野哲志，佐藤努，八田珠郎，山田裕久(2012) 湿式分級洗浄および天然鉱物等による農地土壌等に含まれる放射性セシウム除去方法の実践的検討，日本原子力学会和文論文誌，11，255-271
- 2) H. Kato, Y. Onda, M. Teramage (2012) Depth distribution of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ , and  $^{131}\text{I}$  in soil profile after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident, Journal of Environmental Radioactivity, 111, 59-64
- 3) 「文部科学省による福島県西部の航空機モニタリングの測定結果について」, 2012年9月12日
- 4) 日本経済新聞，2013年11月26日掲載
- 5) 福島民報，2012年2月18日掲載

#### 6.2.8 成果の外部への発表

学会・シンポジウム等発表

- 1) 鈴木正哉・万福和子・星野谷亜衣・森本和也・平林恵理・大和田朗・佐藤卓見・横山信吾・伊藤健一・八田珠郎・万福裕造・北澤英明・末原茂・山田裕久「ため池底質における Cs の分布状態について」第 58 回粘土科学討論会，福島，2014 年 9 月
- 2) 鈴木正哉・万福和子・星野谷亜衣・森本和也・平林恵理・大和田朗・佐藤卓見・横山信吾・伊藤健一・八田珠郎・万福裕造・北澤英明・末原茂・山田裕久「ため池堆積物の放射性 Cs 含量とその分布」鉱物新活用第 111 委員会第 634 回研究会，東京，2014 年 9 月
- 3) 鈴木正哉「セシウムのホットスポットとしての調整池」鹿児島大学シンポジウム：放射性物質汚染に関する汚染被災地の現状と課題，鹿児島，2014 年 10 月
- 4) 鈴木正哉「セシウムのホットスポットとしての調整池」長崎大学シンポジウム：福島県の放射性物質汚染被災地の現状と課題，長崎，2014 年 11 月
- 5) 鈴木正哉「セシウムのホットスポットとしての調整池」九州大学シンポジウム：放射性物質汚染に関する汚染被災地の現状と課題，福岡，2014 年 12 月

## 6.2.9 実施体制(従事者リスト)

	従事者氏名	所属	役職	実施業務
A	鈴木正哉	産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門	上級主任研 究員	放射線量測定 データとりまとめ
B	森本和也	産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門	研究員	放射線量測定 データとりまとめ
C	山田裕久	物質・材料研究開発機構 環境・エネルギー材料部門 環境再生 材料ユニット ジオ機能材料グループ	グループリー ダー	試料採取 試料処理
D	北澤英明	物質・材料研究開発機構 先端的共通技術部門 量子ビームユ ニット	ユニット長	放射線量測定 試料採取
E	河野健一郎	物質・材料研究開発機構 先端的共通技術部門 量子ビームユ ニット イオンビームグループ	研究員	試料採取 試料処理
F	末原茂	物質・材料研究開発機構 先端的共通技術部門 理論計算科学 ユニット 材料特性理論グループ	主幹研究員	放射線量測定 試料採取
G	八田珠郎	国際農林水産業研究センター	主任研究員	試料採取 試料処理
H	万福裕造	国際農林水産業研究センター	主任研究員	試料採取 試料処理
I	佐藤努	北海道大学 大学院工学研究院 環境循環システム部門資源循環工学 分野 環境地質学研究室	教授	試料採取 試料処理
J	伊藤健一	宮崎大学 国際連携センター	講師	試料採取 試料処理
K	横山信吾	電力中央研究所 バックエンド研究センター	主任研究員	試料採取 試料処理
L	中田弘太郎	電力中央研究所 バックエンド研究センター	主任研究員	試料採取 試料処理

## 6.3 パッシブ除染に適する天然材料の最適化・除染現場への適用検討

### 6.3.1 研究報告の概要

昨年度までは、放射性セシウムの存在形態に応じたパッシブ除染に適する材料として珪藻土に着目し、パッシブ除染に適する天然材料としての可能性について検討した。その結果、

- ① 焼成稚内珪藻土のメソポアにより、懸濁粘土粒子のフィルトレーション効果が高いこと。
- ② 焼成珪藻土に捕獲された粘土画分の鉱物組成はバーミキュライトやカオリナイトであり、これらのどちらかが放射性セシウムの運搬媒体であること。
- ③ 焼成珪藻土のメソポアに捕獲された懸濁粘土粒子は容易に回収することができ、粘土画分捕獲のために設置された焼成珪藻土は再生可能であること。
- ④ より流速の早い溪流などに焼成珪藻土を設置したところ、ほとんど粘土画分の捕獲ができず、その捕獲のためには設置条件を検討しなければならないこと。

が明らかとなった。これを受けて、本年度は、実溪流における懸濁粒子のパッシブな捕獲を実施して捕獲粒子のキャラクタリゼーションを行うとともに、先行して検討されている鉱山廃水のパッシブトリートメントの方法をレビューして、除染現場に適用可能なパッシブ除染システムを検討した。その結果、F3 および F4 の全ての試料でバーミキュライトやカオリナイトが含まれていること、F4 に比べ F3 には雲母の明瞭なピークが認められること、すべての試料に石英、斜長石、雲母、角閃石等の花崗岩あるいは花崗閃緑岩起源のケイ酸塩鉱物も含まれることが明らかとなった。様々な研究から、放射性 Cs を固定化して運搬媒体になっている鉱物はバーミキュライトや風化雲母であることが明らかになっているので、最も細かい F4 を捕獲するだけでは F3 に含まれている雲母の除去が十分行われなことになる。昨年度の報告書に示したように、焼成珪藻土で捕獲された細粒粘土粒子は、採集場所が異なるものの、初期の珪藻土には含まれていないバーミキュライトとカオリナイトであった。F3 および F4 にはそれ以外のケイ酸塩鉱物も含まれているので、焼成珪藻土は選択的にバーミキュライトとカオリナイトを捕獲している可能性があることが明らかとなった。また、鉱山廃水のパッシブトリートメントにおいて設置されている石灰岩の設置例をまとめることができた。

### 6.3.2 実施報告の背景・目的

里山や森林の放射線量は住宅地や道路、農地に比べて高い。人が住居する平地に比べて、里山や森林は重機等による除染が困難であるので、除染作業は他の汚染地域に比べかなり遅延している（図 6.3.1）<sup>1)</sup>。しかも、森林で除染の対象になっているのは住居などに隣接している森林の林縁から 20 メートルとなっていて、ヒトが居住していない森林の除染計画はない。20 メートルまでと限定されているのは、除染モデル実証事業による検討の結果、20m 以上範囲を拡大しても、さらなる低減効果は認められなかったことに由っている。しかし、里山や森林の除染無しでは、せっかく除染を行った平地が里山や森林中からの土砂流出により放射性 Cs で再汚染する可能性がある。国立環境研究所<sup>2)</sup>や日本原子力研究開発機構<sup>3)</sup>の調査によると、1 年間に森林外に流出す

る放射性物質は 0.2-0.3% で、森林内に溜まった放射性物質が生活圏に流出する量は極めて小さいとされている。しかし、森林から流失した放射性物質は生活圏に一様に分散するのではなく、流出した土砂などが貯まる溜池や湿地などにホットスポットを形成するので、全く問題視しなくて良いという議論にはならない。それならば、生活圏でない森林も除染を積極的にしたほうが良いという議論になるが、森林の除染効果はあまり高くなく、除染前後の空間線量率の変化は初期の放射線量により異なり数% - 30% 程度にとどまることが知られている<sup>4)</sup>。したがって、ALARA の概念からしても、森林除染を積極的に実施することは合理的ではない。

一方、福島県の総面積の約 70% は森林地帯であり、森林業は福島県の一大産業である。したがって、福島県の本当の意味での再生は、森林再生なくして達成できない。しかし、原発事故後は間伐などの森林施業はままならず、森林地帯の放射線量が低下したとしても買木できる状況ではない。したがって、福島再生のためには、除染の有無にかかわらず、間伐などの森林施業は必要となる。間伐は育木のために実施される森林施業であるが、間伐によって森林からの土壌流出が抑制されることもよく知られた事実である。したがって、間伐施業は、森林地帯からの土砂流出、引いては森林からの放射性 Cs の下流への移行を抑制することになる。しかし、間伐作業中は土砂流出が促進され(特に作業路設置時に)るので、間伐作業時には、流出土砂を下流に流出しないような取り組みが必要である。もし、間伐時の懸濁粘土粒子をしっかりと捕獲できれば、土砂流出時に細粒部分だけ分級されるので、汚染土壌の減容化を考慮した放射性 Cs の捕獲作業になる。除染には、薬剤、電力、人力等を使い日常的なメンテナンスを必要とするアクティブな除染と、それらを極力必要としないメンテナンスフリーに近いパッシブな除染があり、アクティブな除染が困難な森林では、間伐時に泥水の流路等に懸濁粘土粒子を捕獲する材料設置するだけのパッシブな除染が必要と考える。

昨年度までは、放射性セシウムの存在形態に応じたパッシブ除染に適する材料として珪藻土に着目し、パッシブ除染に適する天然材料としての可能性について検討した。その結果、

- ⑤ 焼成稚内珪藻土のメソポアにより、懸濁粘土粒子のフィルトレーション効果が高いこと。
- ⑥ 焼成珪藻土に捕獲された粘土画分の鉱物組成はバーミキュライトやカオリナイトであり、これらのどちらかが放射性セシウムの運搬媒体であること。
- ⑦ 焼成珪藻土のメソポアに捕獲された懸濁粘土粒子は容易に回収することができ、粘土画分捕獲のために設置された焼成珪藻土は再生可能であること。
- ⑧ より流速の早い溪流などに焼成珪藻土を設置したところ、ほとんど粘土画分の捕獲ができず、その捕獲のためには設置条件を検討しなければならないこと。

が明らかとなった。

そこで本年度は、実溪流における懸濁粒子のパッシブな捕獲を実施して捕獲粒子のキャラクターゼーションを行うとともに、先行して検討されている鉱山廃水のパッシブトリートメントの方法をレビューして、除染現場に適用可能なパッシブ除染システムを検討した。

### 6.3.3 実溪流における懸濁粒子のパッシブな捕獲

福島第一原子力発電所の事故後にフォールアウトでもたらされた放射性セシウムは、土壌中の粘土鉱物等に捕獲されて懸濁態として存在し、その移動は河川水の下流域への移動により懸濁粒子とともに移動する。したがって、森林等の放射能の高い地域からの放射性セシウムの下流側への移行を防ぐためには、放射性セシウムを捕獲している細粒の粘土鉱物粒子の移動を食い止めなければならない。本研究では、懸濁粒子のサイズに近いサイズのポアを数多く有する珪藻土によりそれらを捕獲しようと考えているが、それらの懸濁粒子の特性を知らなければならない。そのためには、河川中を流れる懸濁粒子を完全に捕獲しなければならない。現在までに数多くの河川懸濁粒子の捕獲システムが提案されてきており、その中にはパッシブな捕獲システムを提案しているものもある<sup>5,6)</sup>。このパッシブな捕獲システムは、今回目的にしているパッシブな除染につながる技術と考えられる。しかし、現在まで報告されているシステムでは、細粒画分の粒子が取れていない等の問題が指摘されていた。そこで、今回、JAEA と金沢大、北大（佐藤努が担当）の共同研究「森林に沈着した放射性核種の移動形態に関する研究」で、現在までの問題点を改善したパッシブな捕獲システムを構築し、そのシステムによって捕獲された溪流懸濁粒子を得ることができた。以下に、本システムを紹介するとともに、得られた溪流懸濁粒子の特性について調べた結果と、そこから考えられる懸濁粒子捕獲のために求められる材料に求められる特性についてまとめる。

### 6.3.4 溪流懸濁粒子のパッシブな捕獲システムの概略

今回、福島事故の放射性降下物を受けた地域の1つである北茨城市内の広葉樹林（発電所の南西67km）に図6.3.2に示すシステムを設置した。捕獲システムには2つの市販のフィルター容器（高さ957 mm、幅350 mm、6SL-2S, Advantec）が組み込まれ、一番目の容器には、長さ750mm で100ミクロン径のポリプロピレン製のフィルターを6つ入れ、二番目の容器には長さ750mm で0.5ミクロン径のポリプロピレン製のフィルターを6つ入れた。河川水は河川の傾斜を利用し、上流からビニール製のホースによってフィルター容器に導入された。ホースの河川水導入口は、落ち葉や枝などによってホースがつかまらないよう、3mmメッシュ網でカバーした。各フィルターとそこに溜まった粒子は20-50日経過毎に回収し、篩により4つの画分に湿式分級した。分級した画分は、(1) 2,000 $\mu$ m-ca.3 mm (F1)、(2) 500-2,000  $\mu$ lm (F2)、(3) 75-500  $\mu$ m (F3)、(4) <75  $\mu$ m (F4)の4つである。河川水の流量やフィルターを通過した累積流量、降水量などをモニターしながら粒子の捕獲を行った。

### 6.3.5 捕獲した懸濁粒子の量や放射能

図6.3.3に捕獲した懸濁粒子の量と流量、降水量の経時変化を示す。捕獲した粒子の濃度は0.4-8.7mg/Lで、0.45 $\mu$ m径のフィルターでチェックした懸濁粒子濃度と比較すると約94-98%の懸濁粒子が捕獲できていることになる。本捕獲システムは、ロスなく溪流懸濁粒子を捕獲できているものと考えられる。

表 6.3.1 は、異なる捕獲期間における各分画粒子の量と河川流量を示したものである。画捕獲期間で共通していたのは、各分画粒子の相対量の順であり、F4>>F3>>F2>F1 で、最も細粒な画分である F4 の質量が最も多かった。その重量割合はどの捕獲期間でも約

90%であった。表 6.3.2 は異なる捕獲期間における各分画粒子中の  $^{137}\text{Cs}$  の放射能と総有機含有量を示したものである。どの捕獲期間でも最も細粒な画分の F4 の  $^{137}\text{Cs}$  の放射能が最も高く、F1 画分の放射能が高かった R18 を除き、全体の 70%の放射能が F4 画分由来であることが分かる(表 6.3.3)。したがって、パッシブ除染として F4 の画分である  $75\mu\text{m}$  以下の粒子を捕獲することで 70%の除染が可能ということになる。

#### 6.3.6 捕獲した懸濁粒子の鉱物組成

通常、粘土鉱物を含む採集試料中に含まれる鉱物の同定を X線回折分析で行うためには、全岩の不定法による粉末 X線回折分析と 2 ミクロン以下の粒径を分画してガラス板に塗布する定方位法による X線回折分析用の試料の作成が必要になる。定方位法用の試料の作成には、土壌試料を蒸留水に懸濁させて 2 ミクロン以下の粒径を分画する必要がある。しかし、分析に供した溪流懸濁物試料では粘土画分の分画は困難であった。上記の乾燥溪流懸濁物試料を用いた不定方位法では、主成分鉱物である石英等結晶質物質のピーク強度が強く、含有粘土鉱物に帰属される回折ピークが不明瞭である可能性があった。もしそうであると、含有粘土鉱物の存在量の定量的な評価は困難になるが、それらの正確な同定のために、今回は粘土画分を分画せずかつ粘土分の XRD 回折ピークを強調するパウダーオリエンテーション法を採用した。

パウダーオリエンテーション法による XRD 分析のための試料は以下のように作成した。

- i) 粉碎後の乾燥溪流懸濁物試料を葉さじにより 10mg 分取し、脱イオン水  $20\mu\text{L}$  と混合した。
- ii) 超音波分散処理を 20 分行い、ピペットにより懸濁液を吸い取りガラス板に塗布した。
- iii) ガラス板に塗布した試料は、24 時間以上静置して乾燥した後に XRD 分析に供した。

なお、測定に用いた機器は、北海道大学環境地質学研究室が有する粉末 X線回折装置(リガク製 RINT1200)を使用した。測定条件は、管電圧-管電流： $40\text{kV}-30\text{mA}$ 、走査速度： $6.5^\circ/\text{分}$ 、DS スリット： $1^\circ$ 、SS スリット： $1^\circ$ 、RS スリット： $0.15\text{mm}$ 、の条件で行った。

比較的粒径の細かい F3 および F4 試料の XRD パターンの解析から得られた各溪流懸濁物に含まれる主成分鉱物について記す。分析した全ての溪流懸濁物において認められた鉱物は、石英、斜長石、雲母、角閃石、バーミキュライト、カオリナイトであった。本溪流懸濁物の構成鉱物は、花崗岩や花崗閃緑岩の構成鉱物(石英、斜長石、雲母、角閃石)およびその風化二次生成鉱物(バーミキュライト、カオリナイト)であり、風化に対する抵抗性の低い角閃石や斜長石が大量に残存していることから、比較的風化が進行していない”若い”溪流懸濁物であることがうかがえる。主要な粘土鉱物はバーミキュライト、カオリナイトであった。試料の XRD パターンと各ピークのアサイメントの結果を図 6.3.4~6.3.11 に示す。試料によって XRD パターンの  $20^\circ$  ( $2\theta$   $\text{CuK}\alpha$ ) 付近のバックグラウンドの高いものとそうでないものがある。このバックグラウンドは、一般的には非晶質または有機物の含有を示唆するものであるが、表 6.3.2 に記載されている TOC との相関が認められないことから、非晶質物質の含有量の差を示唆するものとする。試料の XRD パターンから、結晶質の鉱物の中では、花崗岩あるいは花崗閃緑岩の造岩鉱物である斜長石や角閃石の含有量が高い。また、F3 画分( $75-500\mu\text{m}$ )と F4 画分( $75\mu\text{m}$ 以下)を比較すると、F4

画分の XRD パターンで風化二次生成物であるバーミキュライトとカオリナイトの回折ピークがより明瞭であった。

ここで注目したいのが、F3 および F4 の全ての試料でバーミキュライトやカオリナイトが含まれていること、F4 に比べ F3 には雲母の明瞭なピークが認められること、すべての試料に石英、斜長石、雲母、角閃石等の花崗岩あるいは花崗閃緑岩起源のケイ酸塩鉱物も含まれることである。様々な研究から、放射性 Cs を固定化して運搬媒体になっている鉱物はバーミキュライトや風化雲母であることが明らかになっているので、最も細かい F4 を捕獲するだけでは F3 に含まれている雲母の除去が十分行われなことになる。昨年度の報告書に示したように、焼成珪藻土で捕獲された細粒粘土粒子は、採集場所が異なるものの、初期の珪藻土には含まれていないバーミキュライトとカオリナイトであった。F3 および F4 にはそれ以外のケイ酸塩鉱物も含まれているので、焼成珪藻土は選択的にバーミキュライトとカオリナイトを捕獲している可能性があることが明らかとなった。

#### 6.3.7 パッシブ除染に組み込み可能なパッシブトリートメントの仕組み

本研究では、パッシブ除染における細粒な溪流懸濁粒子を捕獲するために焼成珪藻土を溪流に設置する必要がある。そこで、先行して精力的に検討が進められている鉱山廃水のパッシブトリートメントで採用されている石灰岩の設置状況を調べた。以下の図 6.3.12～図 6.3.19 にその設置例の写真や概念図を示す。今後はこれらの設置例を参考に、焼成珪藻土の最適な設置方法を検討する。

#### 6.3.5 今後の課題

焼成珪藻土は粘土画分におけるバーミキュライトやカオリナイトだけを選択的に回収できている可能性が示されたが、どの粒径の粒子をどれだけ捕獲できるかについて定量的なデータを取る必要がある。今後は、鉱山廃水のパッシブトリートメントで設置されている石灰岩の設置方法を参考に、設置条件の最適化を図る。

#### 6.3.6 参考文献

- 1) <http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/100431.pdf>
- 2) (独) 国立環境研究所：平成 23 年度環境中の放射性物質の動態解明及び放射性物質に汚染された廃棄物等の効率的な処理処分等研究委託業務報告書
- 3) 日本原子力研究開発機構：平成 23 年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究」成果報告書
- 4) [http://josen.env.go.jp/material/pdf/shinrin\\_20130114.pdf](http://josen.env.go.jp/material/pdf/shinrin_20130114.pdf)
- 5) Priadi C, Bourgeault A, Ayrault S, Gourlay-Franc C, Tusseau-Vuillemin MH, Bont P, Mouchel JM (2011) Spatio-temporal variability of solid, total dissolved and labile metal: passive vs. discrete sampling evaluation in river metal monitoring. J Environ Monit 13:1470-1479
- 6) Phillips JM, Russell MA, Walling DE (2000) Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments.

表 6.3.1 異なる捕獲期間における各分画粒子の量と河川流量

Run	Sampling period	Mass load* (kg day <sup>-1</sup> )				Discharge* (m <sup>3</sup> day <sup>-1</sup> )
		Size fractions				
		F1	F2	F3	F4	
R16	04.10.2012-14.11.2012	0.007	0.095	0.69	8.4	2,426
R17	26.11.2012-21.12.2012	0.004	0.012	0.12	1.3	2,241
R18	21.12.2012-16.02.2013	0.008	0.017	0.21	2.1	2,506
R19	09.03.2012-24.04.2013	0.005	0.018	0.16	2.5	2,493

表 6.3.2 異なる捕獲期間における各分画粒子中の <sup>137</sup>Cs の放射能と総有機含有量

Run	<sup>137</sup> Cs radioactivity concentration					Total carbon content (gC g <sup>-1</sup> )			
	Suspended (Bq g <sup>-1</sup> )				Dissolved (mBq L <sup>-1</sup> )				
	F1	F2	F3	F4		F1	F2	F3	F4
R16	0.33	0.42	0.89	5.0	<i>n.m.</i>	0.47	0.46	0.33	0.26
R17	0.34	0.28	0.94	3.8	2.0	0.43	0.39	0.32	0.23
R18	3.00	0.32	0.61	3.5	1.6	0.38	0.43	0.23	0.25
R19	0.29	0.50	0.76	3.6	3.2	0.48	0.45	0.42	0.24

表 6.3.3 各分画粒子を捕獲した時の放射能の減少割合

Run	F4を除いた場合	F4とF3を除いた場合	F4-F2を除いた場合
R16	75.3%	88.7%	95.0%
R17	70.9%	88.4%	93.7%
R18	47.1%	55.3%	59.6
R19	70.0%	84.7%	94.4

**市町村除染地域全体(36市町村)の除染実施状況**  
**平成26年度末までの計画数に対する除染の進捗状況(平成26年12月末時点)**

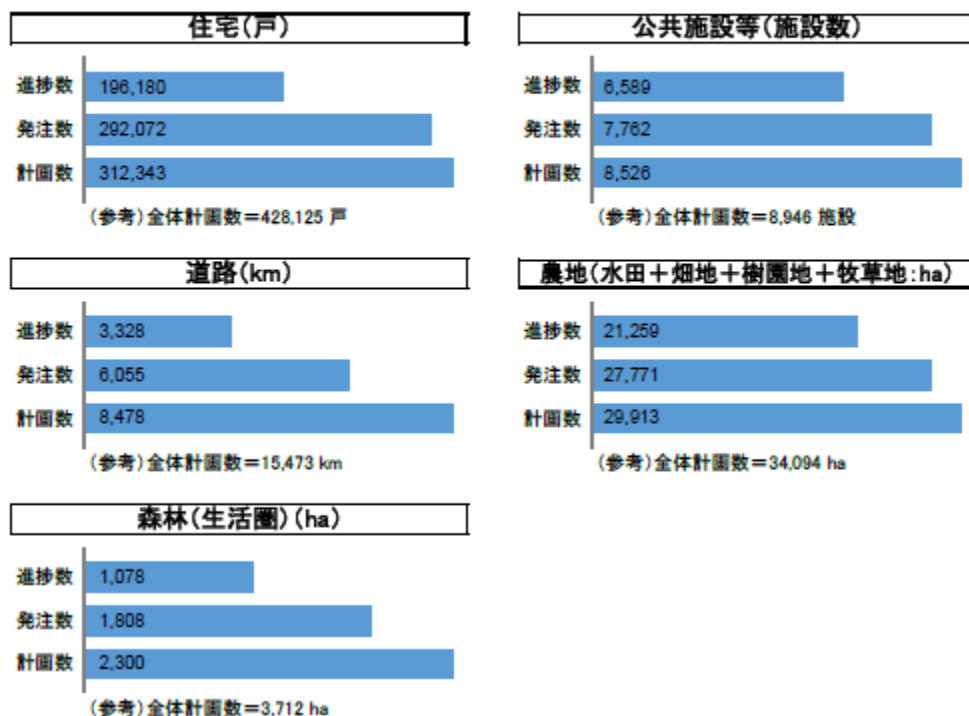


図 6.3.1 平成 26 年 12 月末現在までの除染の計画、発注、実施状況

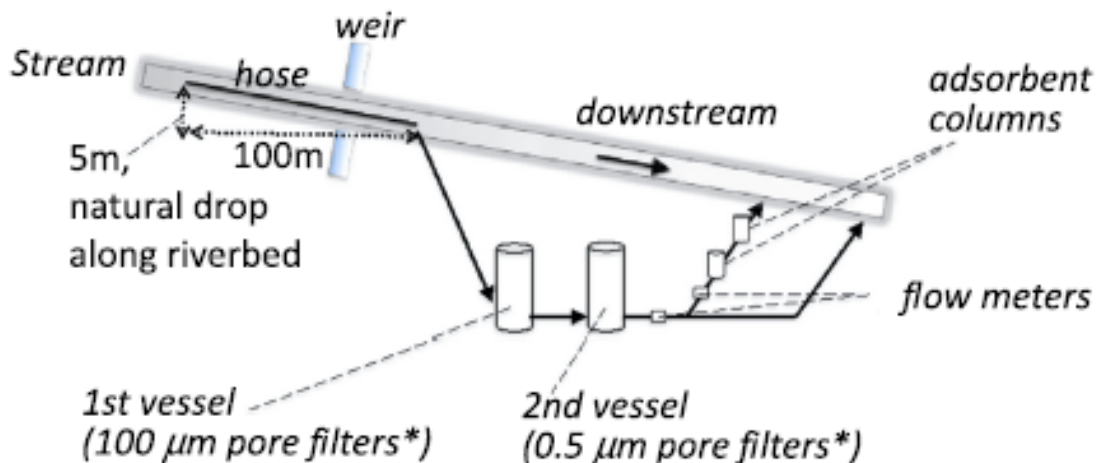


図 6.3.2 北茨城市内の広葉樹林に設置したパッシブな粒子捕獲システム

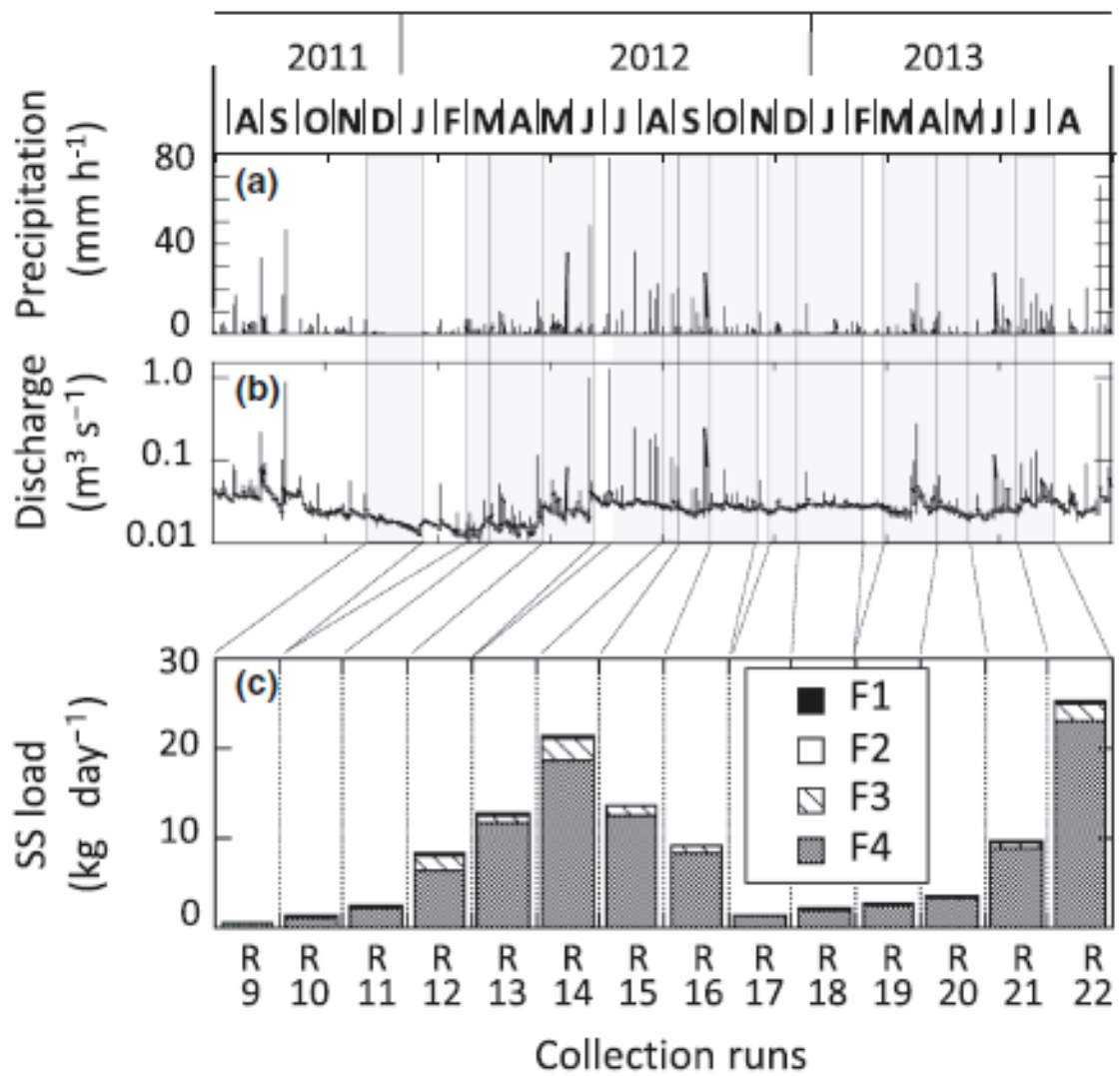


図 6.3.3 捕獲した懸濁粒子の量と流量、降水量の経時変化

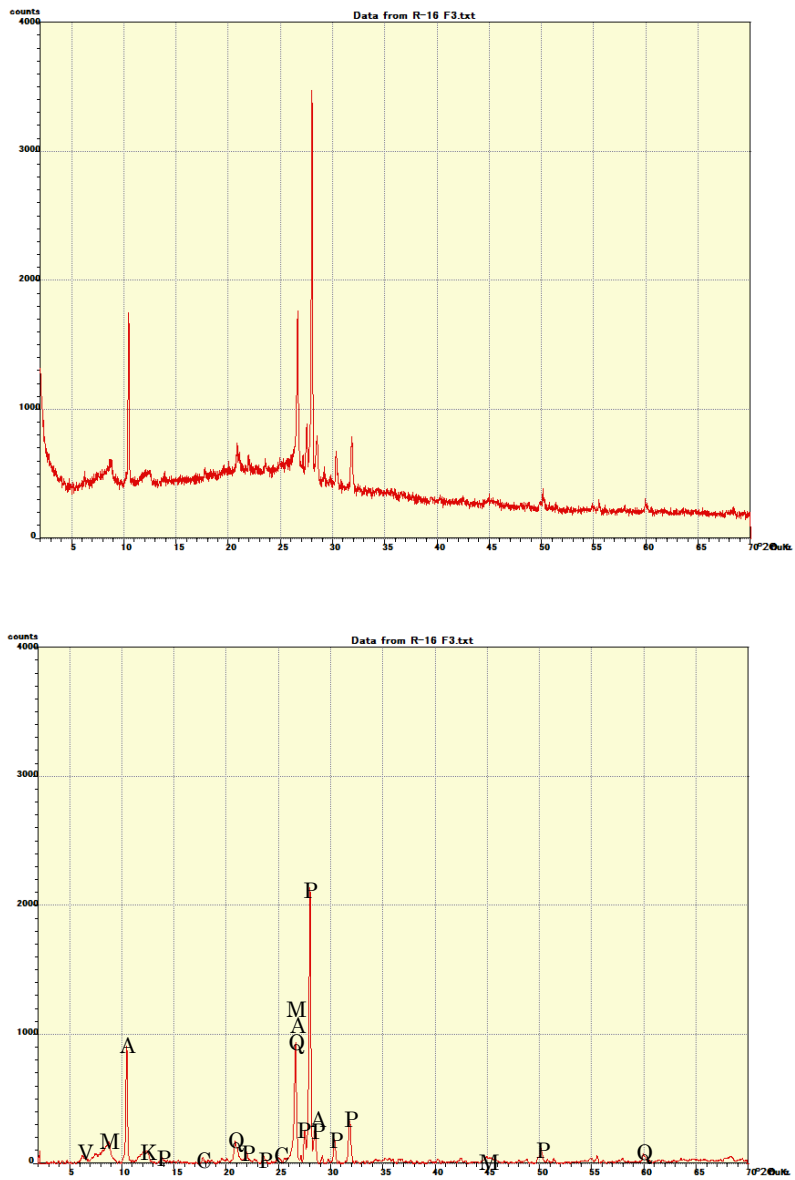


図 6.3.4 R16-F3 試料の粉末オリエンテーション法によって測定された XRD パターン（上）とバックグラウンド処理を行って各ピークに対してアサイメントした結果（下）  
 凡例は A：角閃石、V：バーミキュライト、M：雲母、P：斜長石、Q：石英、K：カオリナイト

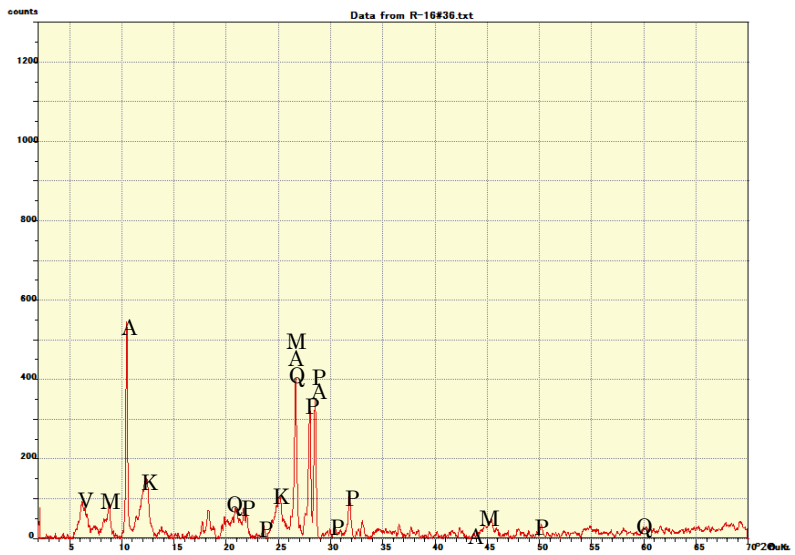
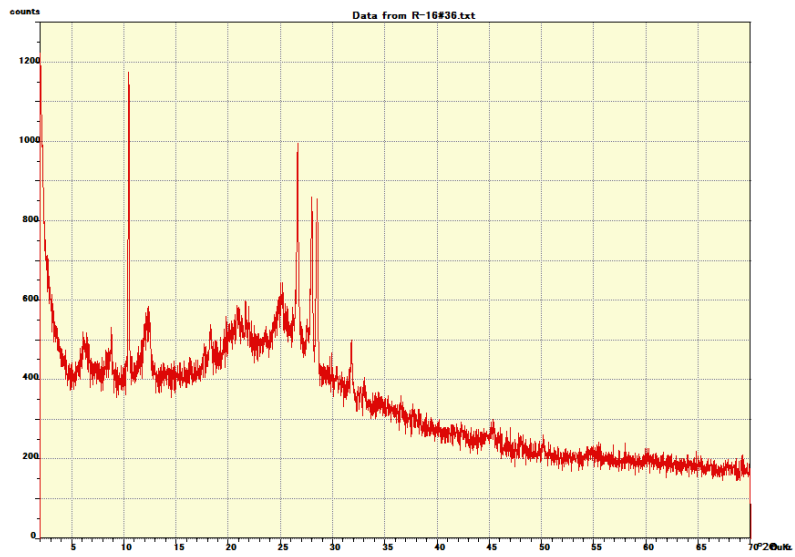


図 6.3.5 R16-F4 試料のパウダーオリエンテーション法によって測定された XRD パターン（上）とバックグラウンド処理を行って各ピークに対してアサイメントした結果（下）  
 凡例は A：角閃石、V：バーミキュライト、M：雲母、P:斜長石、Q:石英、K:カオリナイト

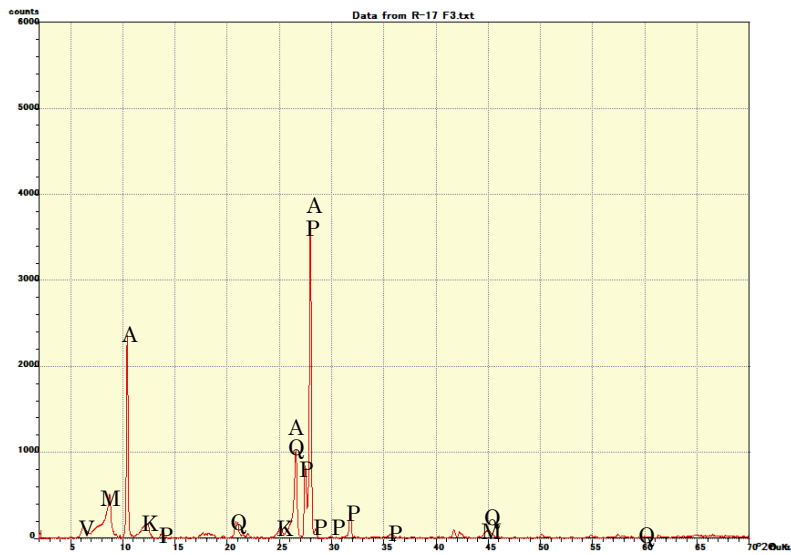
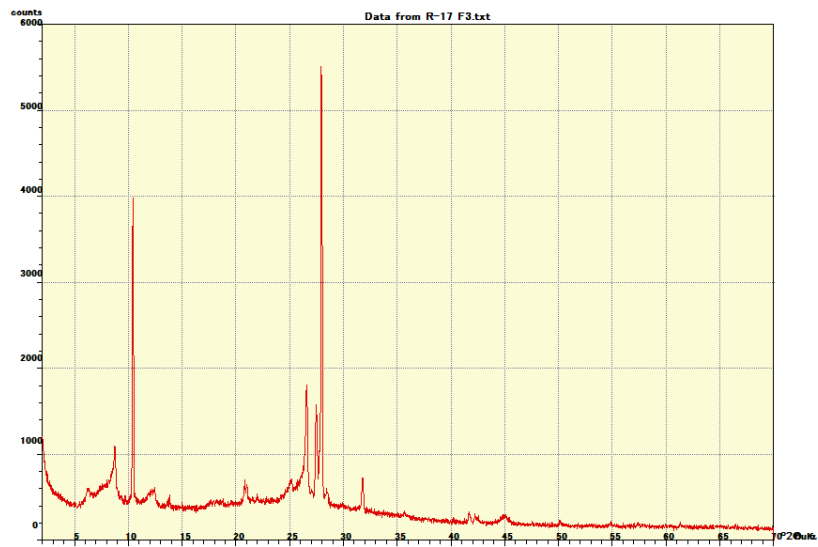


図 6.3.6 R17-F3 試料の粉末オリエンテーション法によって測定された XRD パターン（上）とバックグラウンド処理を行って各ピークに対してアサイメントした結果（下）  
 凡例は A：角閃石、V：バーミキュライト、M：雲母、P：斜長石、Q：石英、K：カオリナイト

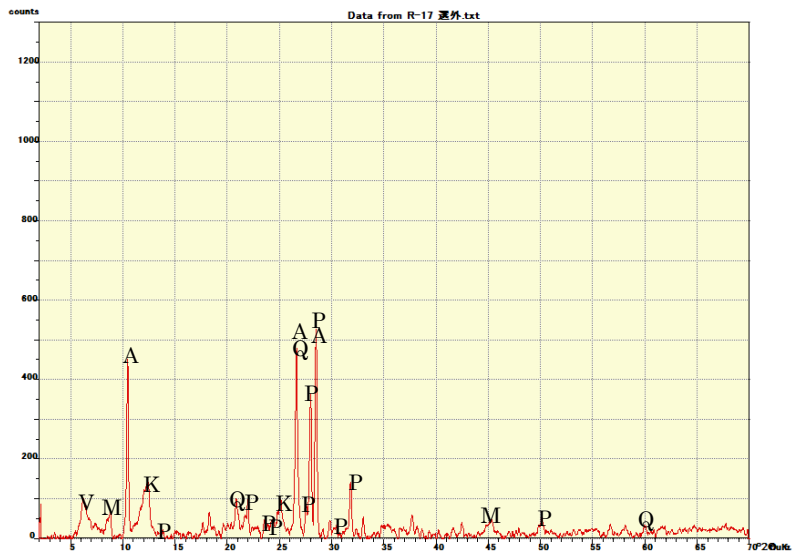
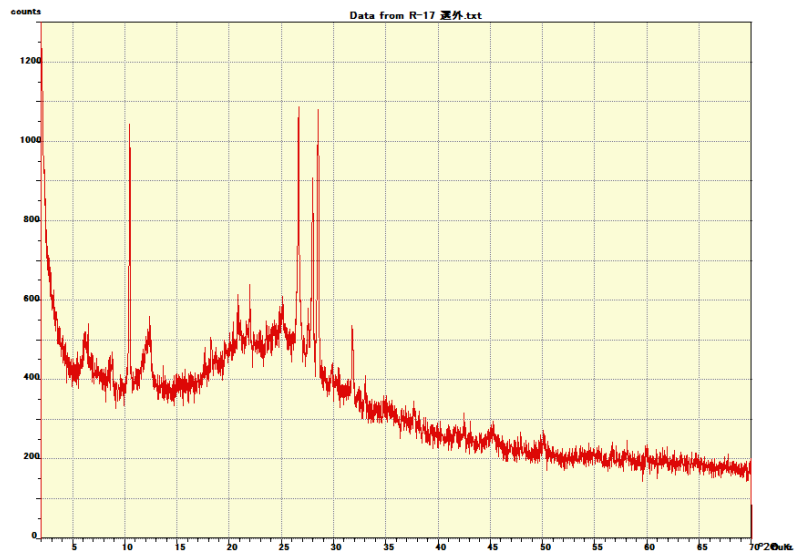


図 6.3.7 R17-F4 試料のパウダーオリエンテーション法によって測定された XRD パターン（上）とバックグラウンド処理を行って各ピークに対してアサイメントした結果（下）  
 凡例は A：角閃石、V：バーミキュライト、M：雲母、P：斜長石、Q：石英、K：カオリナイト

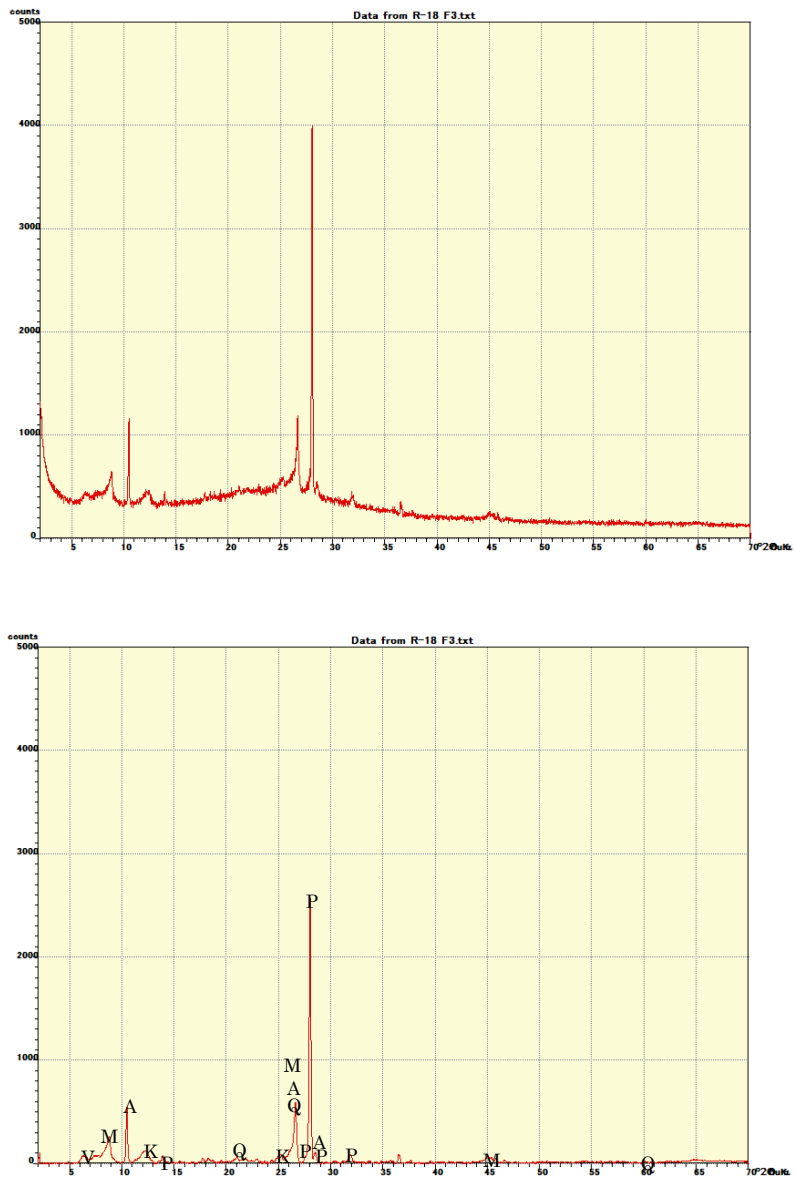


図 6.3.8 R18-F3 試料の粉末オリエンテーション法によって測定された XRD パターン（上）とバックグラウンド処理を行って各ピークに対してアサイメントした結果（下）  
 凡例は A：角閃石、V：バーミキュライト、M：雲母、P：斜長石、Q：石英、K：カオリナイト



図 6.3.9 R18-F4 試料の粉末オリエンテーション法によって測定された XRD パターン（上）とバックグラウンド処理を行って各ピークに対してアサイメントした結果（下）  
 凡例は A：角閃石、V：バーミキュライト、M：雲母、P：斜長石、Q：石英、K：カオリナイト



図 6.3.10 R19-F3 試料のパウダーオリエンテーション法によって測定された XRD パターン（上）とバックグラウンド処理を行って各ピークに対してアサイメントした結果（下）  
 凡例は A：角閃石、V：バーミキュライト、M：雲母、P：斜長石、Q：石英、K：カオリナイト

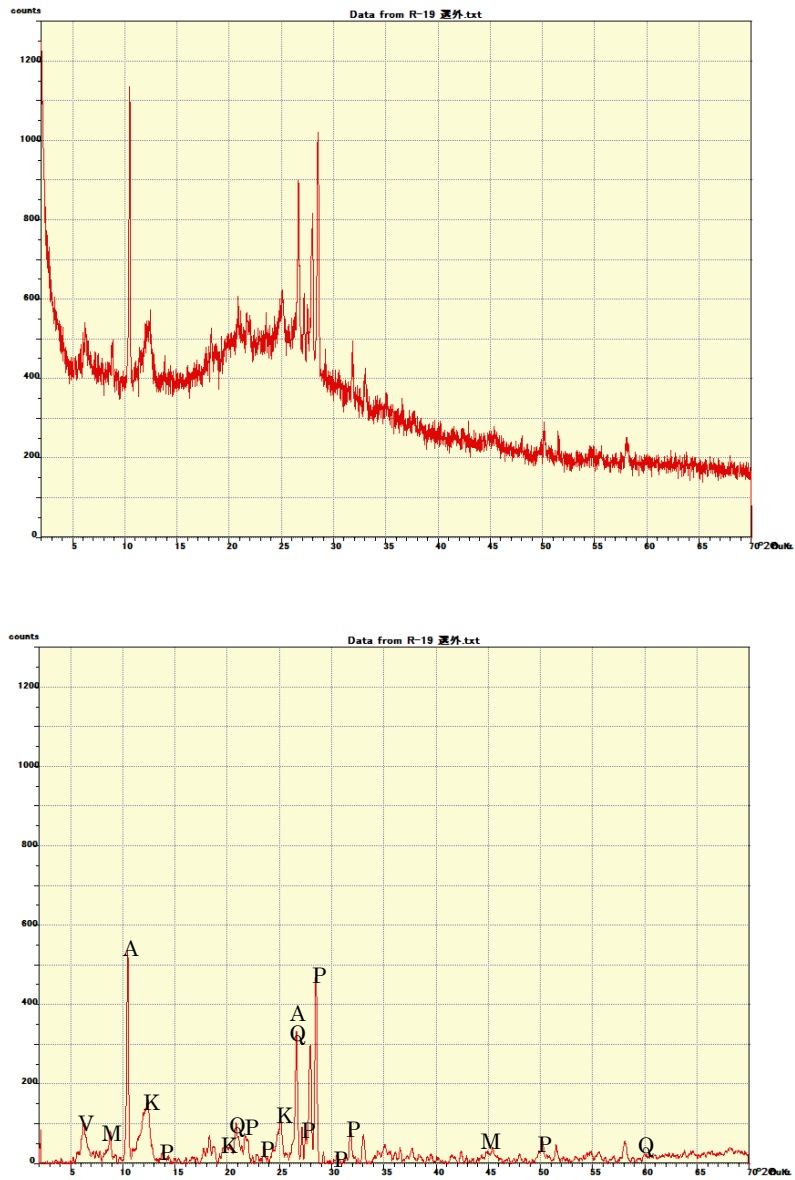


図 6.3.11 R19-F4 試料の粉末オリエンテーション法によって測定された XRD パターン（上）とバックグラウンド処理を行って各ピークに対してアサイメントした結果（下）  
 凡例は A：角閃石、V：バーミキュライト、M：雲母、P：斜長石、Q：石英、K：カオリナイト

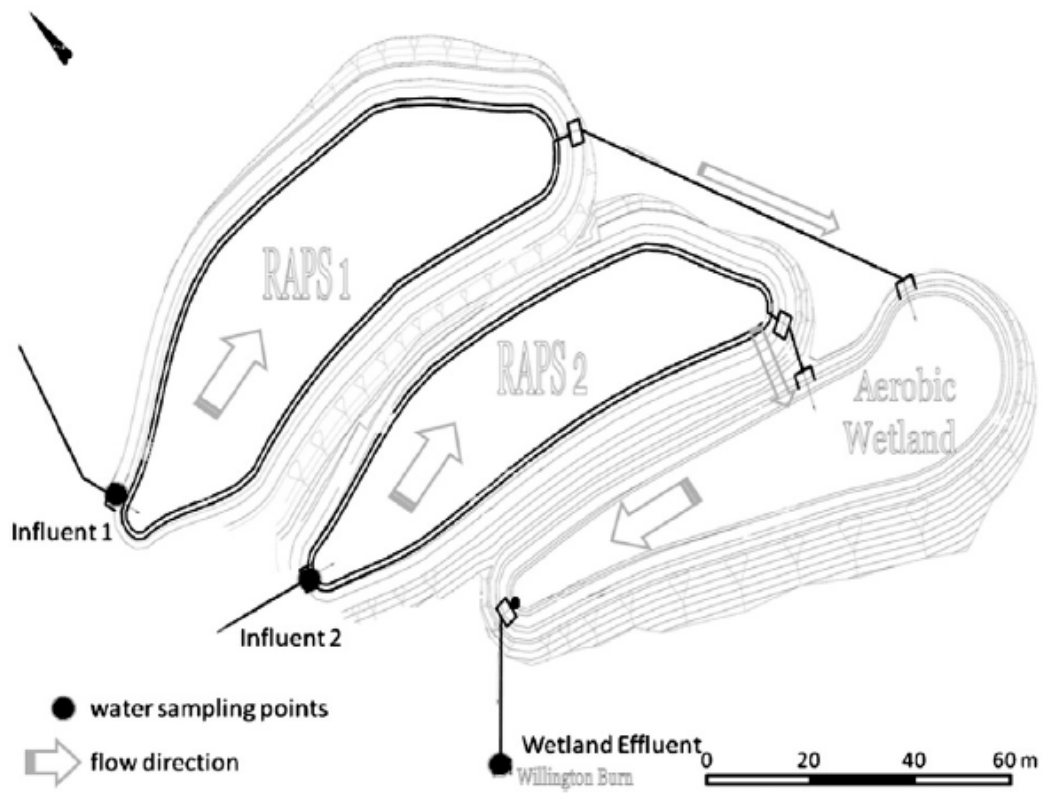


図 6. 3. 12 鉦山廃水のパッシブトリートメントにおける石灰岩の設置事例

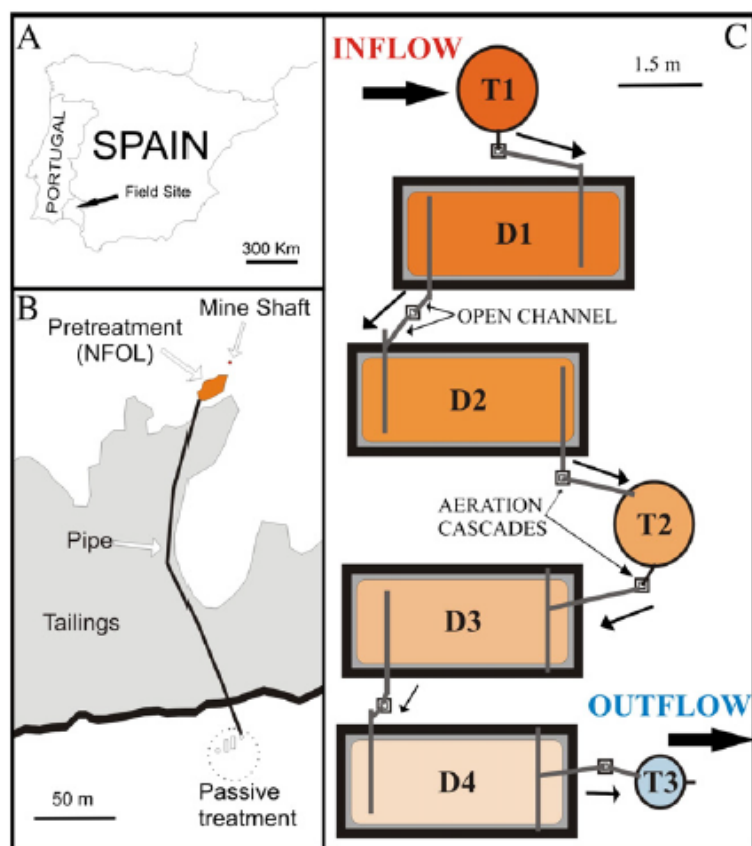


図 6.3.13 鉱山廃水のパッシブトリートメントにおける石灰岩の設置事例

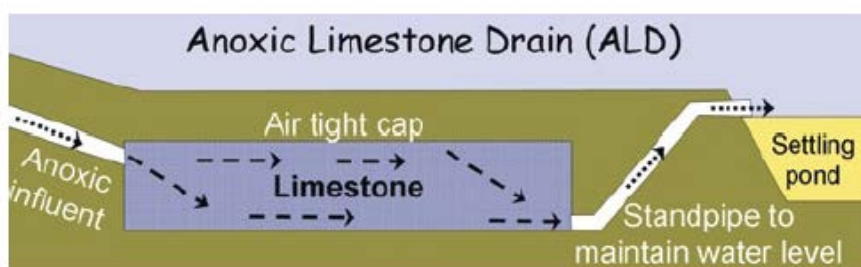


図 6.3.14 鉱山廃水のパッシブトリートメントにおける石灰岩の設置事例



図 6.3.15 鉱山廃水のパッシブトリートメントにおける石灰岩の設置事例

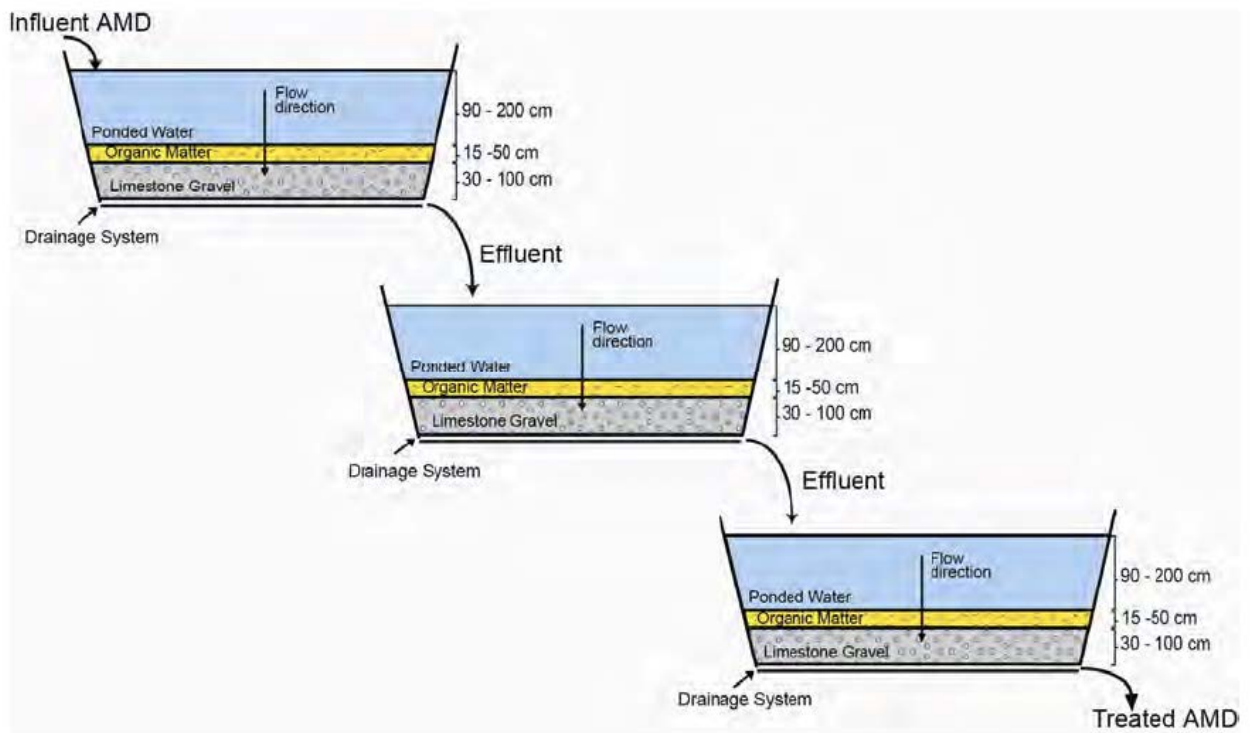


図 6.3.16 鉱山廃水のパッシブトリートメントにおける石灰岩の設置事例

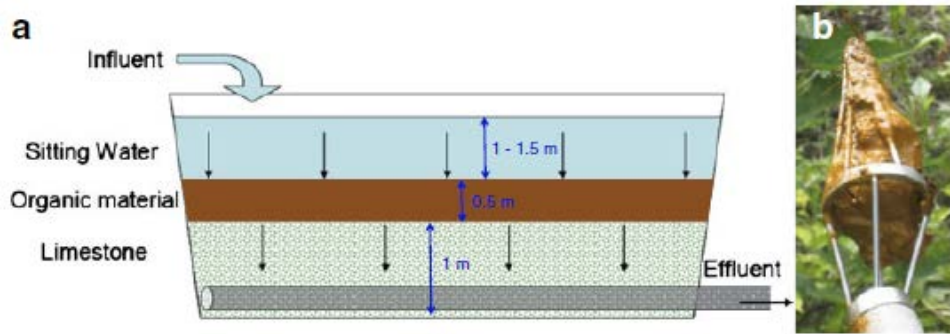
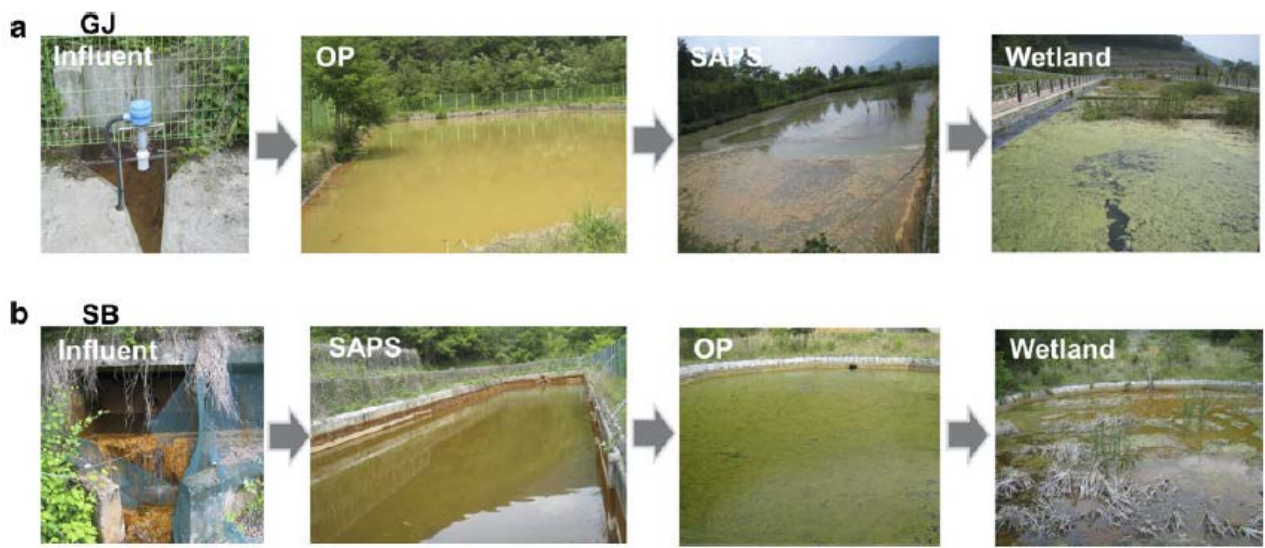


図 6.3.17 鉱山廃水のパッシブトリートメントにおける石灰岩の設置事例

【坑廃水の中和】

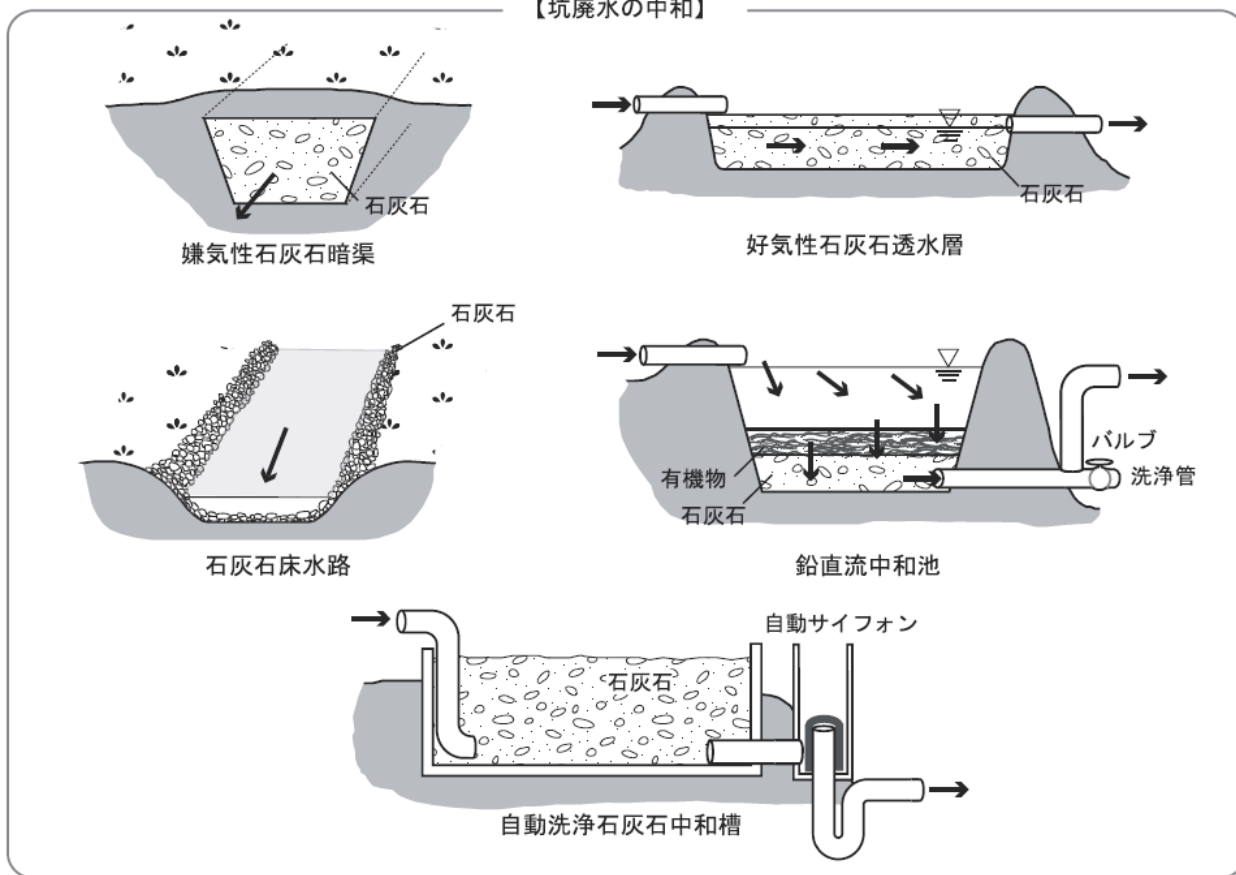
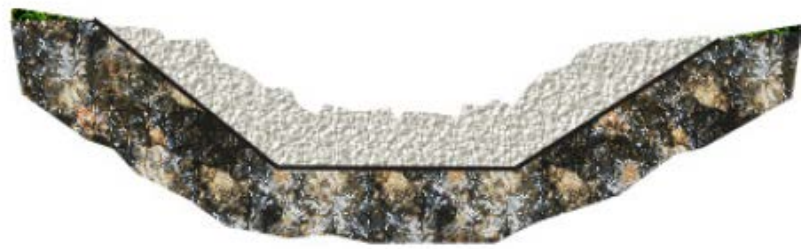
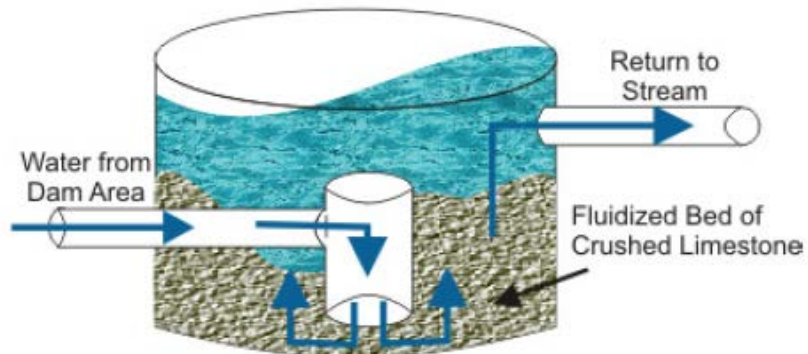


図 6.3.18 鉱山廃水のパッシブトリートメントにおける石灰岩の設置事例



Cross Section of an  
Open Limestone Channel

Schematic View of a  
Diversion Well



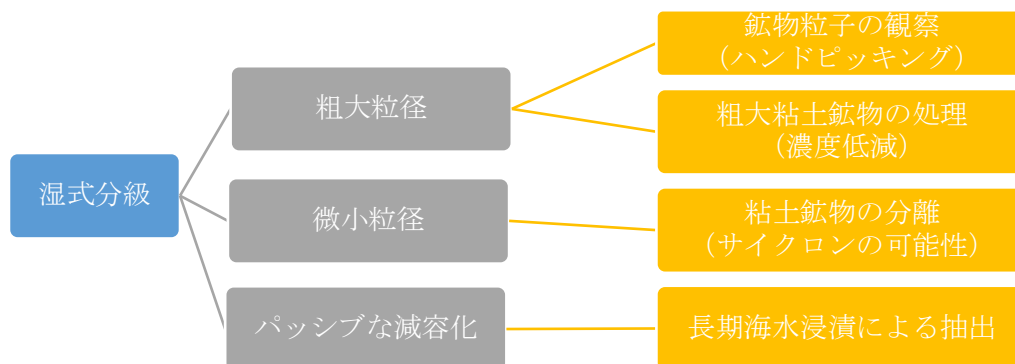
*Anoxic Limestone Drains (ALD)*

図 6.3.19 鉱山廃水のパッシブトリートメントにおける石灰岩の設置事例

## 6.4 高度分級技術の要素抽出・減容化基盤技術の検討

### 6.4.1 研究報告の概要

宮崎大学では、独立行政法人物質・材料研究機構からの再委託を受け、「粘土鉱物に対する放射性物質への吸脱着機構解明と減容法の開発」に資する、「高度分級技術の要素抽出・減容化基盤技術の検討」に関する検討を実施した。具体的には、土壌中の粒子単位に着眼した放射性セシウムの分布傾向をバルクレベルで明らかにすることと、それを受けた減容化の実施的側面からの分級法のみには依らない、粗大粒径の濃度低減やパッシブな長期的 Cs 抽出などである。また、微細粒径画分の更なる分離には、実務レベルで使用されながら鉱物観察の例が少ないサイクロンについても粘土鉱物の分離などによる検討を行った。以下に、検討の分類と各検討の概要を示す。



以上の検討から、粗大粒径より単一に回収された鉱物粒子群の分析により粘土鉱物に Cs が濃集することがバルクレベルで確認された。また粗大粒径画分中に残留する粘土などの微粒子については資源工学的な粉碎などの処理によりを剥離・除去できることが示された。微細粒径画分についても、サイクロンの運用により粘土鉱物を主体とした画分を回収できることが確認された。しかし、Cs は粘土鉱物を抽出してもそれより大きな粒径画分にも分配することもわかったことから、より選択的な分離技術の必要性が示唆された。

本年の検討では、技術リファレンスの構築に向けた検討も新たに開始された。既存の技術情報を収集・整理・分類し、それに本プロジェクトの基礎研究成果を含め情報発信する方法を検討した。検討の結果、種々の課題や留意点が上がったが、適正な運営体制や提示情報の在り方を構築していくことで進められる方向性が見出された。この中で、次年度では試験的公開を行って実地に検討していく方法も検討された。

### 6.4.2 実施の背景・目的

環境省の発表では、中間貯蔵の対象となる除染における表土の剥ぎ取りや有機物の焼却予定などで生じる膨大な除染廃棄物の土壌や焼却灰等は約 2,200 万  $m^3$  であり、8,000 Bq/kg 以下の土壌が約 1,000 万  $m^3$ 、8,000 Bq/kg 以上 10 万 Bq/kg 以下の土壌が約 1,000 万  $m^3$  と計算されている<sup>1)</sup>。この 8,000 ~ 10 万 Bq/kg の土壌については濃縮・減容化できる余地があり、特に 30,000 Bq/kg 以上に関しては 30 年後も 8,000 Bq/kg を超過することからその必要性が検討されている。

汚染土壌に対して、これまでに本プロジェクトでも地盤工学や土木工学分野における重金属類土壌汚染対策などで培われた湿式分級などの分離技術による実処理を見据えた減容化の要素技術の検討を進めてきた<sup>2)</sup>。一方、本プロジェクトにおいては先端的ナノ科学分析により放射性セシウムの粘土鉱物等の土壌粒子における分配や、吸脱着機構の解明が進んでおり、分離の対象とすべき土壌粒子について明確化しつつある<sup>3)</sup>。こうした科学的成果を活用することが、減容化の高度化につながる。しかしながら、そうした科学的成果については、粘土鉱物だけを選択的に分離する技術の開発が進められるなどのうごきに繋がりにくく、実処理や実現場への反映が乏しい。これは、基礎科学的研究成果と実処理には未だ大きな乖離が存在していることを示唆している。その一因としては、除染や減容化の実務を担う地盤や土木などの分野は、除染・減容化関連事業だけでなく平素の事業においても、国及び行政機関の案件や指導およびガイドライン等の下で業務が進められるため、企業が行政等との共同ではなく独自に基礎科学の活用による新技術の開発・活用をすることが難しい風土にあることなどが考えられる。

こうした現状認識を踏まえて、社会において科学的知見の活用および実用化を進めるには、本プロジェクト内において、より科学的知見と技術を結び付けるところまで検証、つまりは、“科学的根拠に基づく(Evidence based)”実用技術のモデルの提供と、そのための個別技術の要素検証が必要と考えられる。加えて、それら科学的知見と技術の社会へ情報を発信、提供の方法として技術リファレンスなどのアウトリーチが考えられる。そこで、本年度は科学的知見と現場手法をつなげるための要素試験を実施した。これまで、重金属類土壌汚染対策技術を転用した湿式分級などを実施してきたが、現場実証寄りの検証であった。そこで、セシウムの粒子、鉱物別での分配とその分離に着眼し、現場での分級技術手法を用いながらも、ミクロ、ナノ領域で観察される科学的知見を裏付けるための検証を行った。併せて、分級技術の本来の起源である資源工学分野における選鉱など鉱物特性を学んだ分離技術についても検証した。さらには、パッシブな減容化として、貯蔵後の減容化を見据えた海水による長期浸漬・抽出の実験的検討を行った。また、以上の実験的検討の他に、思考的検討として、“科学的根拠に基づく(Scientific Evidence Based)”な減容化の実施支援のための技術リファレンスの確立に向けたアウトリーチ方法の検討を行った。検討は、まず公知技術の情報を収集・整理し、それらを科学的視点から技術分野別に分類し、検証した。

#### 6.4.3 試験・調査方法

##### 6.4.3.1 高度減容化のための要素検討

検討内容について、実施項目別に以下に示す。

###### ① 粒子特徴別分配傾向の観察

分級処理は、土壌を解して篩う処理であるため、処理後の状態としては基本的には嵩が増える。粗大粒径画分が清浄であり、これを安全なものとして取り出すことで、処分すべき汚染物質を残留する微細粒径のみとして減量、減容化する方法である(図 6.4.1)。災害廃棄物(コンクリートくず等)の再生利用の場合であれ

ば、3,000Bq/kg 以下が指標と想定される<sup>4)</sup>。しかし、単純な分級だけでは粗大粒径画分にそれ以上の放射性セシウム（以下 Cs）が残留することから、粗大粒径画分中の Cs の低減が分級法適応の課題の一つとなっている。そこで、この粗大粒径画分中の粒子を特徴別に分類し、観察、放射性セシウム 134 と 137 の放射線量の測定（以下 Cs 線量測定）を行うことで、処理の対象とすべき粒子および鉱物を明らかとすることをを行った。

実験には、平成 25 年度の本研究において分級した津島と大熊の試料のうち、2-4.75 mm、500 μm-2 mm の 2 画分について一定量を分取し、それぞれ実体顕微鏡下での観察と外観的特徴別の手選別（ハンドピッキング）を行い、選別試料の重量割合、Cs 線量、粉末 X 線回折分析（以下 XRD）による鉱物同定を行った。

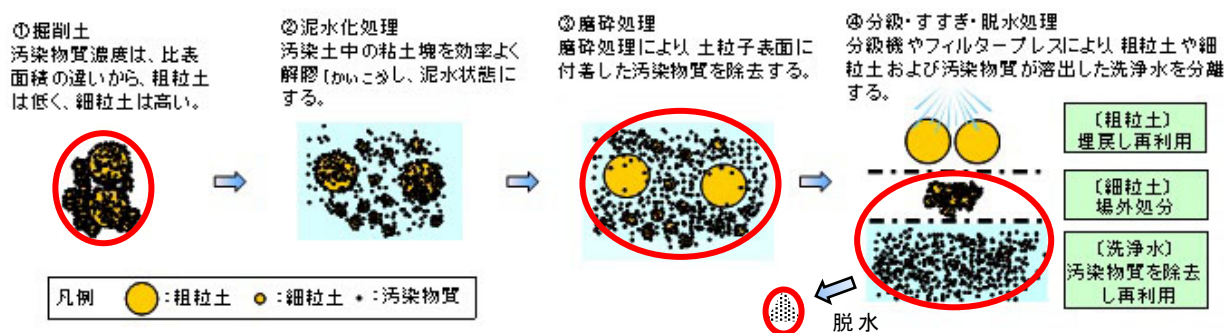


図 6.4.1 土壌汚染における汚染土壌の分級洗浄浄化システムの処理フローイメージ

5)

## ② 粗大粒径中の粘土鉱物の処理

これまでの分級試験の結果や①の検討の結果、粗大粒径画分にも粘土鉱物や団粒などに濃集して Cs が残留していることが判った<sup>2)</sup>。湿式分級法は重金属類土壌汚染対策技術の転用と応用により実施されているが、Cs 対策では、より低い濃度での厳しい管理が要求されること、また重金属類と異なり Cs は土壌から洗浄等により溶脱しにくいことが粗大粒径画分の濃度低減を困難としている。そこで、湿式分級の更に原点である、資源工学分野における選鉱や選別といった分離技術に学びそれを適用した、粗大粒径画分からの粘土の分離による低線量化の基礎的検討をすすめた。検討には、同分野の研究で豊富な実績と蓄積を有する北海道大学大学院工学研究院環境循環システム部門資源循環工学分野資源再生工学研究室の廣吉直樹教授と伊藤真由美准教授のご指導、ご協力を戴いた。鉱物の選別、分離の方法の一つに、剥離などによる選択粉碎がある（図 6.4.2）。これは、複合的な資源、例えば表面の鉄マンガン酸化物が硬く、内部の有価資源を含む核石（中心となる石）が比較的柔らかい鉄マンガンノジュールなどについて、強度特性の違いを利用して破碎、分離する技術である。原子力分野では、解体された原子力発電所のコンクリート構造物から骨材のみを取り出すために、破碎後にも骨材表面に残留するコンクリート片を剥離することなどに応用されている。Cs を濃集する粘土鉱物、特に福島で観察されている黒雲母やパーミキュライトは風化鉱物であ

り、石英や長石など他鉱物に比べて柔らかい、脆いという物理的特徴がある。そこで、砂やシルト、粘土を含む土壌から Cs を濃集するとされる粘土のみを除去するために、この強度特性に着目し、ボールミルを用いた粗大粒径画分中の雲母など粘土の選択的破碎と再分級に粘土の剥離、分離を検討した。試料には、飯館村の山津見と蕨平の水田の汚染された表層下部の下層土を持ち帰り、コールド試料として用いた。実験は、本試料を提供して同研究室にて実施したされた。

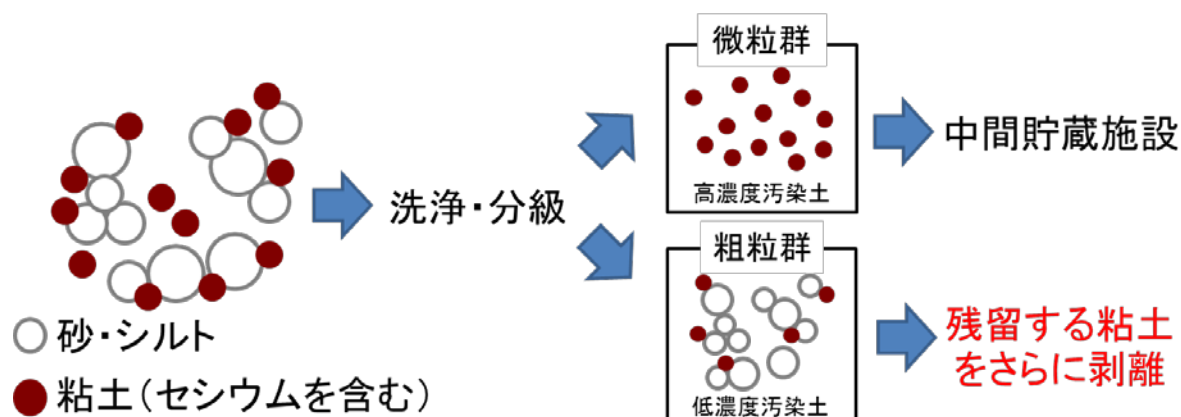


図 6.4.2 分級により微粒画分と粗粒画分への選別と剥離対象のイメージ

### ③ 微細粒径の分離

現行の実務レベルにおける湿式分級は、分級点の下限はおおむね  $75\sim 125\mu\text{m}$ 、サイクロンなどの利用により  $20\mu\text{m}$  程度まで実施されている。地盤分野における粒径区分では  $75\mu\text{m}$  以下がシルト、 $5\mu\text{m}$  以下が粘土とされている。したがって、一般的な分級点では粘土より大きいシルトも廃棄対象として除去していることとなる。また、セシウムを濃集する粘土鉱物の粒径は、雲母などは大きなものもあるが、一般にはおよそ  $0.2\sim 2\mu\text{m}$  の範囲である。そこで、山津見と蕨平を用いて、篩による湿式分級で  $45\mu\text{m}$  以下まで分級後、液体サイクロン（村田工業株式会社製 T-10, TR-5）を組み込んだ図 6.4.3 の装置により微細粒径画分での分離を行い、粘土鉱物の分離を検討した。



図 6.4.3 湿式サイクロン装置外観

#### ④ 長期海水浸漬による抽出

土壌中の Cs は容易に脱離，溶出しないことは，既往研究や調査，および本プロジェクトにおける電力中央研究所等の研究からも明らかとなっている<sup>6)</sup>。一方，国立環境研究所の報告によれば，データは未発表ながら，土壌中の Cs は海水へは溶脱することも報告されている<sup>7)</sup>。こうした報告等から，土壌中の Cs は濃度勾配により海水中でナトリウムイオンなどに置換して溶脱するが，その浸出は限定的か，あるいは長期間を要するものと推察される。仮に時間がかかっても海水で土壌中の Cs が脱離，分離可能であるならば，海辺に近い中間貯蔵施設においてその保管期間中に，長時間の海水への暴露，浸漬，洗浄により，保管物の Cs の分離と Cs 線量の低減による減容化が可能ではないか思案される。

そこで，人工海水を用いた連続溶出試験により，海水による土壌中からの Cs 脱離による減容化手法の基礎的検討を行った。国立環境研究所の報告では 6 時間程度の浸漬では溶脱しないとのことから，数か月単位の浸漬を行うこととした<sup>6)</sup>。飯舘村の山津見と蕨平の土壌試料を 40℃ の恒温機で乾燥後，各 5.0g 分取し，人工海水（製品名：アクアマリン（八州薬品製，金属腐食試験用）と精製水で 20L の人工海水を調製した。2 本の 750ml 遠心分離用容器に，試料と人工海水 500ml を入れ，振とう機（EYERA 製 MMS-110）にセットして 60rpm で振とうした。7 日間振とう後，容器を遠心分離機（ベックマン・コールター製 AllegraX-12）で 3,750rpm で 30 分間遠心分離して 0.2 $\mu$ m 以上の粒子を沈澱させ，上澄みをディスクポアセシウムラドディスク（3MTM 社製， $\phi$ 47mm，対象核種 Cs-137,Cs-134）でろ過した。最終のろ液は PP ボトルに保存し，溶存する人工海水等の成分の濃度をイオンクロマトグラフィーと ICP-AES により測定した。上澄みを除去された固相の残る遠心分離用容器には，新たな人工海水を加えて，再度振盪した。この操作を 7~14 日間毎に繰り返し，連続溶出試験を実施した。ラドディスクについては，土壌から溶脱する放射性セシウムの濃度が極めて低いと予想されることから，繰り返し使用し，2 か月毎の交換とした。メンブレンフィルターで回収された微粒子とラドディスクはそれぞれゲルマニウム半導体検出器により Cs 線量を分析した。

#### ⑤ 現地調査および支援

本検討では，現地の汚染土壌およびその模擬的コールド試験のため汚染土壌と同質な非汚染土壌を要するため，福島県飯舘村にて本プロジェクトにおける調査の折に採取した。また，環境調査および土壌、重金属等汚染等における現場野外調査の経験などから，飯舘村におけるため池の底泥の調査等について，現場調査器具の調達，調査計画，実施について支援を行った。

#### 6.4.3.2 技術リファレンス構築のための基礎的検討

宮崎大学の規定に従った手続きを経て役務発注を行い、外注機関協力して調査検討を行った。

外注先 日本工営株式会社

担当 鈴木 弘明（所属：日本工営株式会社中央研究所）

期間 2014年11月18日～2015年1月30日

業務名 以下の2点

- ① 放射性物質汚染土壌の減容化に関する情報収集・整理業務
- ② 放射性物質汚染土壌の減容化に関する情報解析業務

業務内容全体

- (1) 減容化手法に関する文献収集
- (2) 減容化手法に関する文献整理
- (3) 減容化手法の分類
- (4) 減容化手法の技術動向の検討及び課題点の抽出
- (5) 減容化手法の解説文作成
- (6) 減容化手法に関する用語解説の作成
- (7) 減容化技術情報の一般公開に向けたスキームの作成

#### 6.4.4 実施研究および検討の結果および考察

##### 6.4.4.1 高度減容化のための要素検討

各検討の結果を以下に示す。

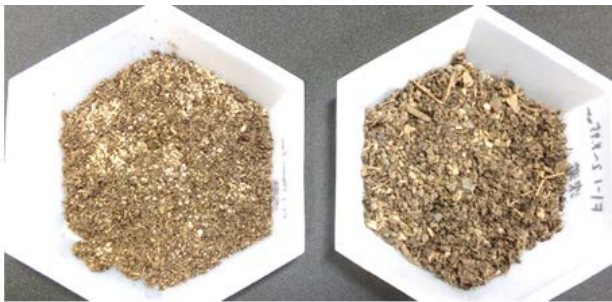
##### ① 粒子特徴別分配傾向の観察

浪江町津島で採取された土壌（試料名：津島）と大熊町の東京電力福島第一原子力発電所敷地近傍の土壌（試料名：大熊）について、篩により0.5-2mm, 2-4.45mmの粒径画分を回収して用いた。分級された各土壌をエタノールにより浮遊選別して有機物などの浮遊物と分離後、実体顕微鏡下でピンセット等により、有機物（沈降）、団粒、透明・白、橙、黒、青、緑、人工物、金色・平板状および0.5mm以下に分別した。試料と分別した各粒子群の外観図6.4.4, 6.4.5に示す。



津島 500µm~2mm

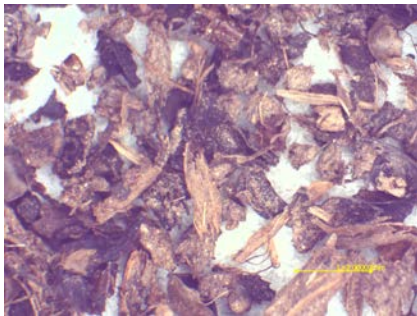
2~4.45mm



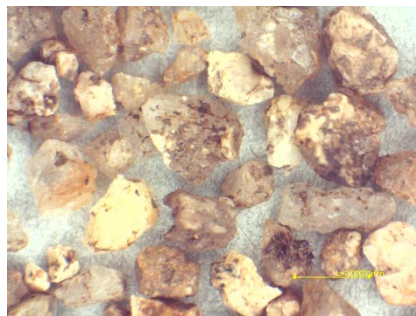
大熊 500µm~2mm

2~4.45mm

図 6.4.4 手選別に供した各土壌試料



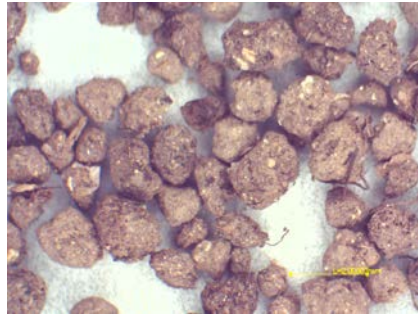
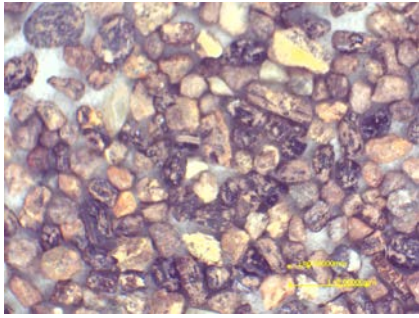
有機物(津島:0.5-2mm)



透明・白(津島:0.5-2mm)



橙・丸形(津島:0.5-2mm)



黒・青・緑(津島:0.5-2mm)

団粒(津島:0.5-2mm)

平板(津島:0.5-2mm)



0.5mm 以下(津島:0.5-2mm)

有機物(津島:2-4.75mm)

透明・白・橙(津島:2-4.75mm)





黒・青・緑(津島:2-4.75mm)

団粒(津島:2-4.75mm)

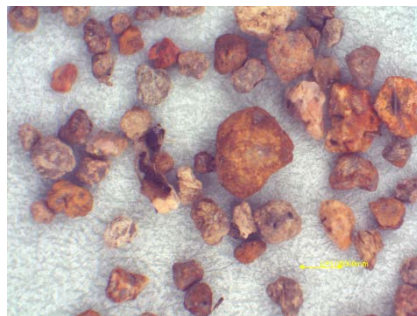
浮遊物(大熊:0.5-2mm)

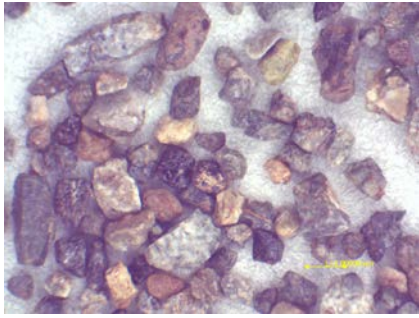


有機物(大熊:0.5-2mm)

透明・白(大熊:0.5-2mm)

橙・丸形(大熊:0.5-2mm)

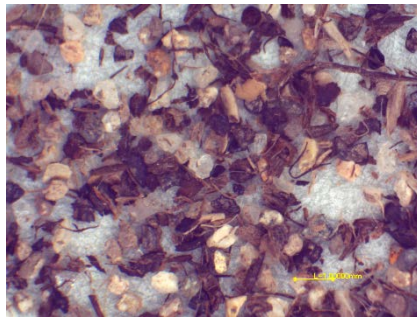
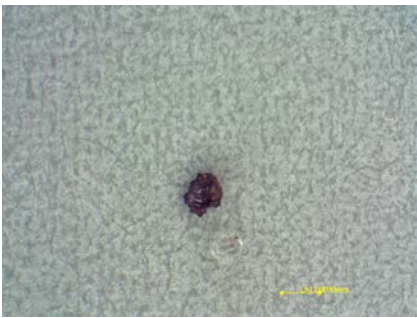




黒・青・緑(大熊:0.5-2mm)

団粒(大熊:0.5-2mm)

金色・平板(大熊:0.5-2mm)



人工物(大熊:0.5-2mm)

0.5mm 以下(大熊:0.5-2mm)

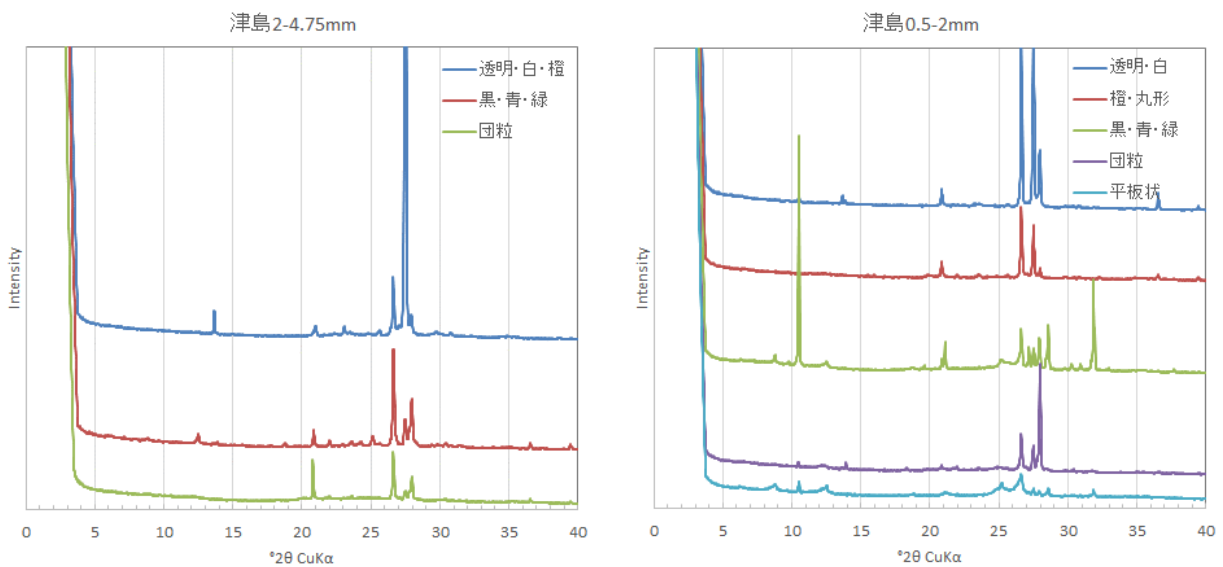
有機物(大熊:2-4.75mm)



透明・白・橙(大熊:2-4.75mm) 黒・青・緑(大熊:2-4.75mm) 団粒 (大熊:2-4.75mm)

図 6.4.5 手選別した各粒子群の外観

XRD 回折パターンを 6.4.6 に示す。外観から分けられた粒子群は、XRD 回折パターンにおいても鉱物種として分別されていることが確認された。透明・白、橙・丸形では石英や長石が優勢であり、黒・青・緑と団粒では石英や長石のピーク強度が下がって粘土鉱物など他の鉱物が混在する傾向が見られた。また、平板状、金色平板状では、石英などの結晶性の高い鉱物の強度は著しく低減し、明瞭な粘土鉱物のピークが観察された。



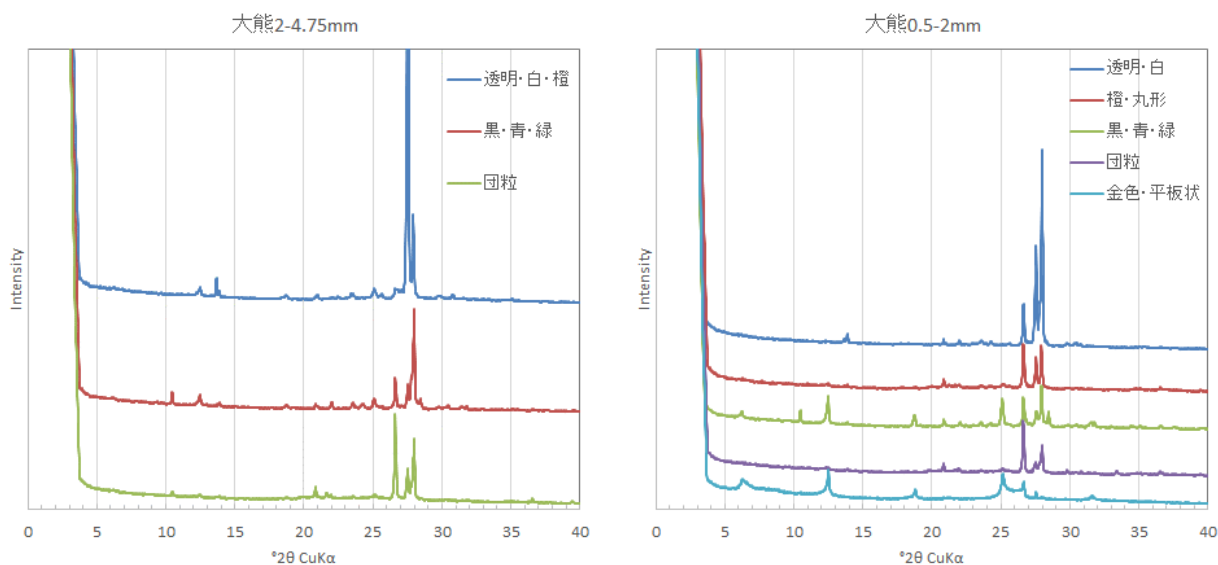


図 6.4.6 手選別した各粒子群の XRD 回折パターン

手選別された各粒子群の Cs 線量を図 6.4.7 に示す。津島については平板状，団粒，0.5mm 以下の画分，および 0.5-2 の細かな有機物で Cs 線量は高い傾向を示した。大熊も近い傾向を示し，特に粘土鉱物の優勢な金色・平板状では 10 万 Bq/kg を超える高い値を示した。しかし，津島では低かった黒・青・緑や橙・丸形の粒子群でも比較的高い値を示した。図 6.4.5 の外観および鉱物分析結果から，粒子表面の隙間などに膠着した粘土鉱物とみられる微細粒子が含む Cs のために線量が高くなったと考えられる。

各粒径画分の粒子群別の重量割合と Cs 線量割合を図 6.4.8 と 6.4.9 に示す。図中に緑で示す石英等の透明・白（および橙）の粒子群は重量割合ではどの粒径画分でもおよそ 40-70% を占めるが Cs 線量割合では 10-20% 程度であることが判る。一方，有機物と団粒では明らかに重量割合より Cs 線量割合の方が高い傾向を示した。したがって，有機物と団粒を除去することでこれら粗大粒径画分の線量は大幅に下がり，それでも石英等の 40-70% に橙・丸形や黒・青・緑の粒子群を加えた 60-80% を残すことができることが示唆された。また，Cs 線量が高い金色・平板状の粗大な粘土鉱物については，重量割合が 1% 以下と極めて低いために Cs 線量割合も 5% 以下であることから積極的な除去対象とならない可能性が考えられた。

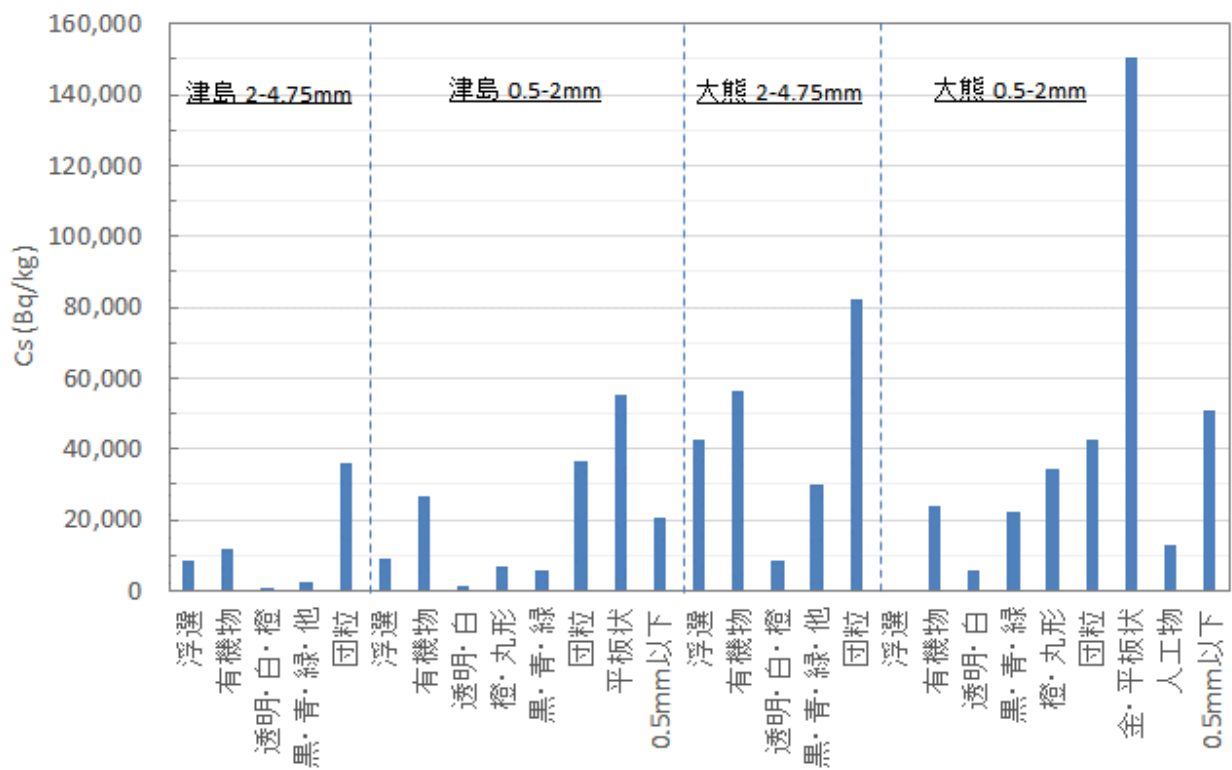


図 6.4.7 各手選別粒子群の Cs 線量

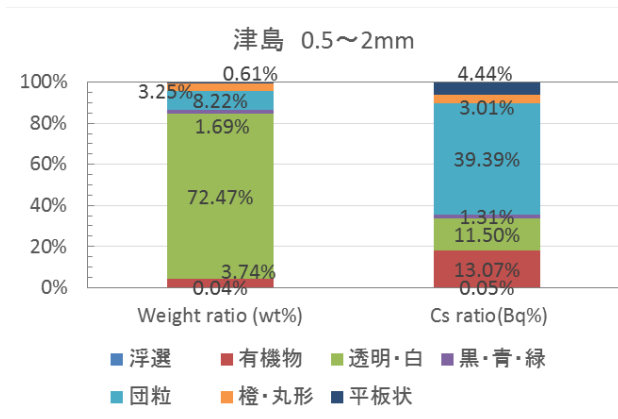
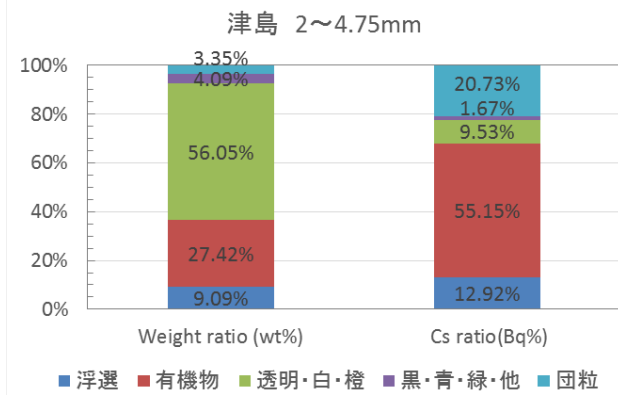


図 6.4.8 津島の各粒子群の重量割合と Cs 線量割合の比較

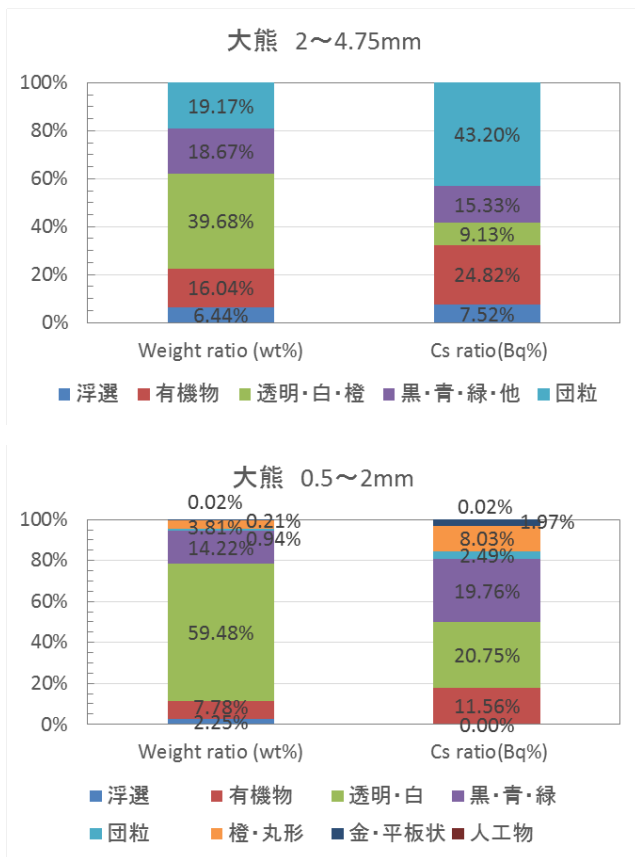


図 6.4.9 大熊の各粒子群の重量割合と Cs 線量割合の比較

② 粗大粒径中の粘土鉱物の処理

ボールミルによる粉砕の効果には、高回転時にミル上部まで試料およびボールが持ち上がって落下する衝撃力主体の粉砕と、低回転時にミル下部で粒子とボール同士が擦り合わされる摩耗主体の粉砕の2種類がある(図 6.4.10)。そこで予備試験として、鉱物や粒子がその強度などにより各処理条件で粉砕される程度について検討した。500-710 $\mu\text{m}$ の石英, 方解石[CaCO<sub>3</sub>], 方鉛鉱[PbS], 重晶石[BaSO<sub>4</sub>]を各 5g, アルミナ球(直径 2.1 cm) 25 個とともにミルポッド(内径 13cm)に封入して粉砕した。回転速度は、臨界回転速度(ボールが遠心力でミルポッド内壁に張り付いて落下せず回転する速度)の 80%(本機では 102rpm)を高回転条件, 20%(26rpm)を低回転条件として実施した。粉砕後, 106 $\mu\text{m}$ のふるい目を通過した試料の質量割合で粉化度を評価した。

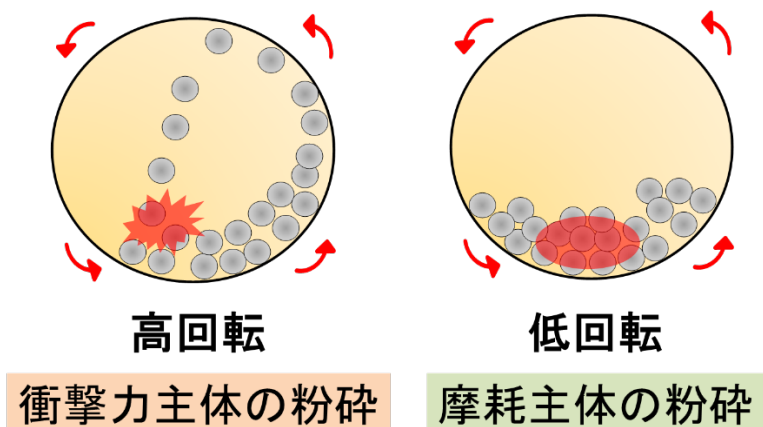


図 6.4.10 ボールミルにおける粉砕の種類

各鉱物における粉化度の割合を図 6.4.11 に示す。粉化度は石英が最も低く、破碎されにくいことを示した。回転数では高回転の方が高い粉化度を示した。また、いずれの条件でも鉱物間の粉化度の傾向は同様であり、石英<方解石<重晶石<方鉛鉱の順であった。これにモース硬度を重ね合わせると、石英(7)>方解石(3)>重晶石>(2.5)>方鉛鉱(2.5)でおおむねモース硬度の順となった。しかし、低回転条件において、モース硬度3の方解石の粉化度が、硬度の近い重晶石や方解石よりも石英に近い傾向を示したことから、鉱物同士の引掻きによる損耗で比較するモース硬度と衝撃や摩耗によるボールミルでは耐久性の傾向が異なること、そのためにモース硬度を粉砕時の指標とすることは難しい可能性があることが示唆された。

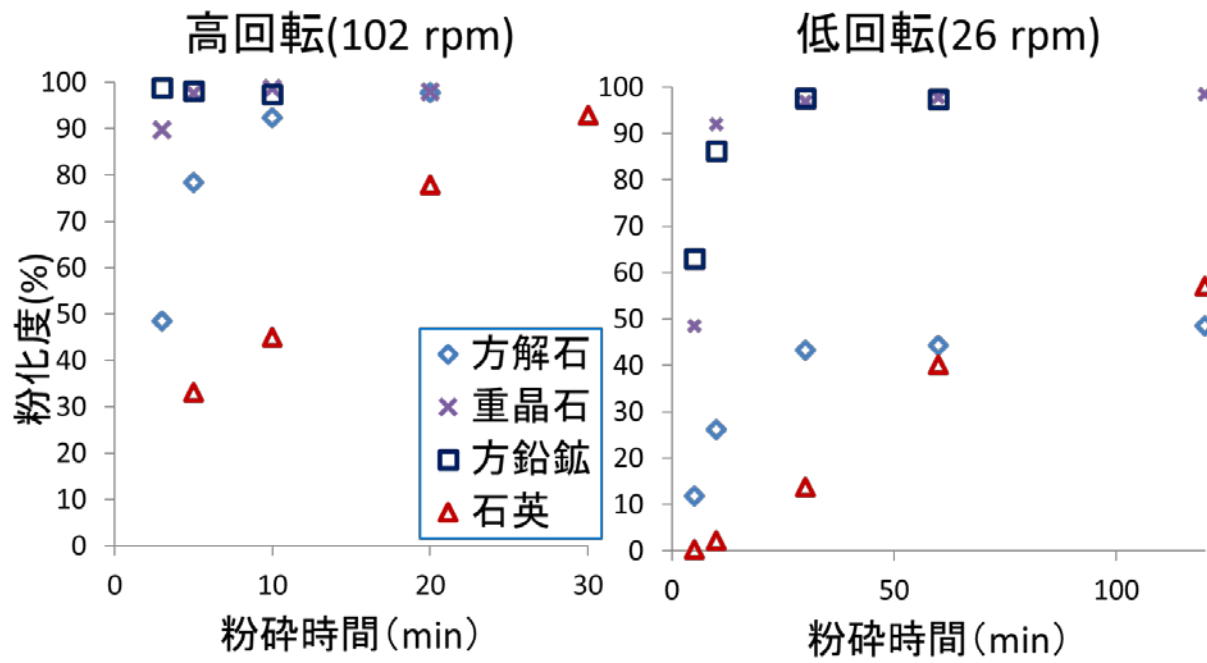


図 6.4.11 ボールミルにおける粉砕の種類

図 6.4.12 の山積見神社近傍から採取された土壌（試料名：山津見）と蕨平周辺土壌から採取された土壌（試料名：蕨平）について、XRD パターンを図 6.4.13 に示す。どちらも類似した解説パターンを示し、石英、長石、雲母、角閃石、バーミキュライト、カオリナイトが確認された。これらの土壌から、250 $\mu\text{m}$ 以上の粒径画分を回収して以降の試験に供した。まず、理想条件を確認するため、300mlの水に分散後、分散剤へキサメタリン酸ナトリウムを250ppmとなるよう添加して超音波で1分間分散した後、攪拌して5分静置し浮揚物を除去する操作を3回繰り返して、剥離処理を行い、粒度分布を確認した。各土壌の粒度分布を図 6.4.14 に示す。粒度分布から、山津見は処理後にも粗大粒径が残留しながら75 $\mu\text{m}$ 以下の粒径画分が特に増えていることから、粗大粒子を核石とした表面や周辺に微細な粒子が付着している状態と推察された。また、マイクロスコープ観察からもその様子が確認された（図 6.4.15）。一方、蕨平は、処理後に山津見以上に粗大粒径画分が減少し、更には75 $\mu\text{m}$ 以下の粒径画分が大幅に増加するとともに150-212 $\mu\text{m}$ の粒径画分も大きく増加したことから、150-212 $\mu\text{m}$ の粒子が核石となって75 $\mu\text{m}$ 以下の粒子とともに凝集した団粒のような状態で粗大粒径画分に分配されていたと考えられる。

以上の結果を踏まえて、今回の検討では粗大粒子からの剥離に着目していることから、以降の検討では対象試料を山津見に絞り、ボールミルによる剥離処理を検討した。



図 6.4.12 使用した土壌試料（左：山積見神社近傍土壌，蕨平周辺土壌）

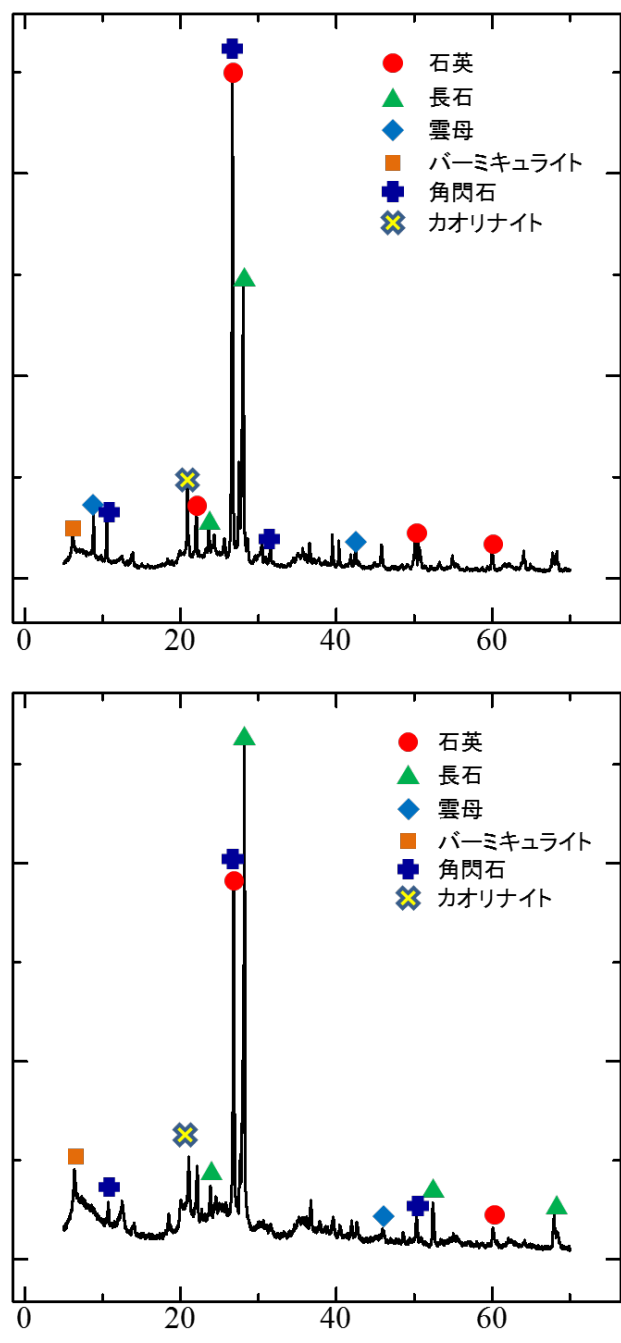


図 6.4.13 土壌試料の鉱物分析結果（左：山積見神社近傍土壌，蕨平周辺土壌）

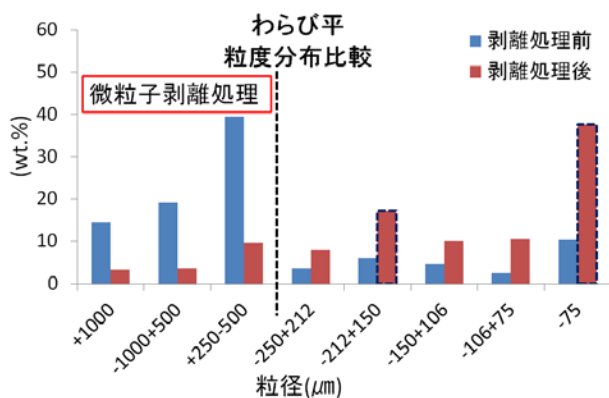
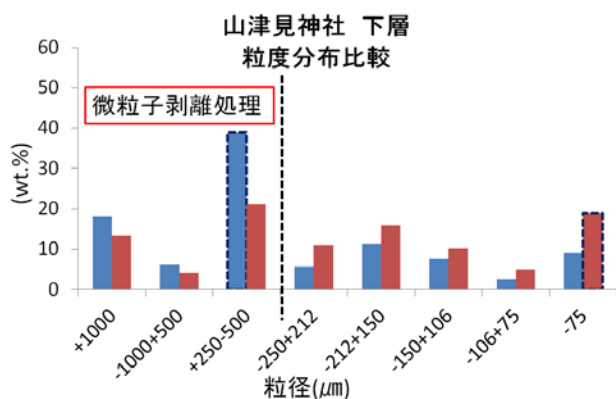


図 6.4.14 剥離処理前後の各土壌の粒度分布

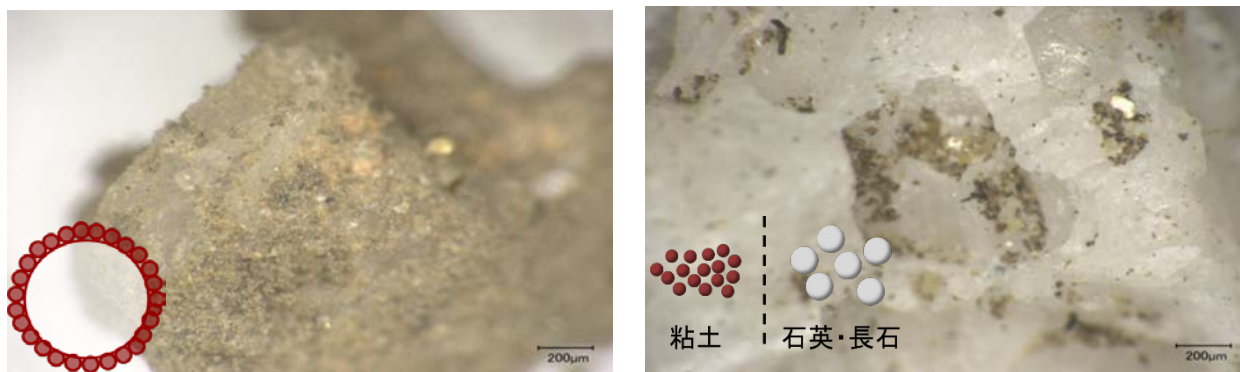


図 6.4.15 マイクロスコープ観察と粗大粒子から微細粒子を剥離するイメージ  
(左：未処理の粗大粒子，右：剥離後の粗大粒子)

山津見の 500-2,000 $\mu\text{m}$  について，水を加えた湿式ボールミルにより粉砕の検討を実施した。試料 15g と 12 個のアルミナ球（直径 1.5 cm），および水 50ml をミルポッド（内径：6.4cm）に封入し，臨界回転速度の 80%（160 rpm）の高回転条件と 20%の（40 rpm）の低回転条件で，5-20 分の処理を行い，106 $\mu\text{m}$  のフルイ目で細粒分を分離，秤量して比較した。結果を図 6.4.16 に示す。処理の結果，先の理想条件（図中の超音波）に比べて，高回転も低回転も細粒が多い傾向となった

ことから、処理過程で細粒の剥離だけでなく、粗粒の粉砕も生じて細粒分を増量させたと推察された。そこで、ボールを12個から6個へと減らして再度検討を行った。その結果、高回転の5分、低回転の10分の処理により、理想条件と同程度の細粒の割合で処理することができた（図6.4.17参照）。

処理後の剥離と分離の性能を確認するため、剥離、分離された106 $\mu\text{m}$ 以上の粗大粒径画分について、超音波処理後に再度ふるって微細粒子を除いて秤量した。結果を図6.4.18に示す。低回転、高回転ともに約15%の減量が見られた。剥離粉砕後も粗大粒子表面に重量の約15%程度の微細粒子が残留することが示唆された。以上の結果から、粗大粒径表面の微細粒子の剥離に対してボールミルによる処理は有効であることが確認された。

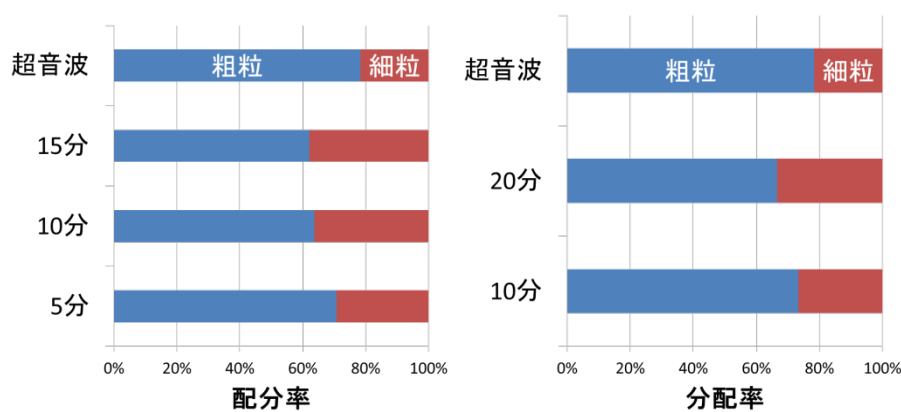


図 6.4.16 ボールミル（ボール 12 個）による粉砕試験結果（左：高回転（160rpm），右：低回転（40rpm））

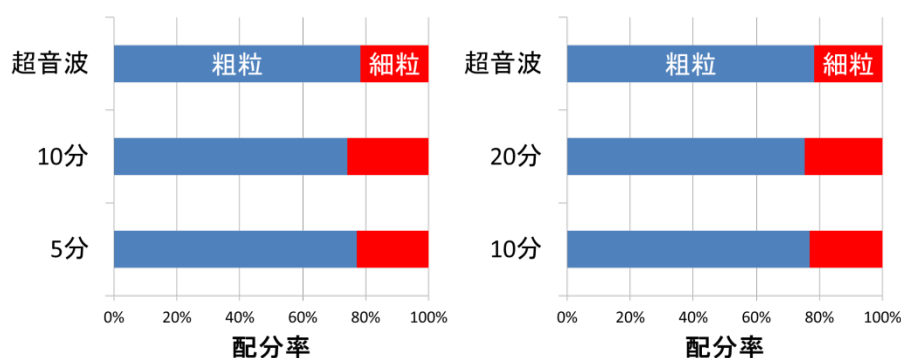


図 6.4.17 ボールミル（ボール 6 個）による粉砕試験結果（左：高回転（160rpm），右：低回転（40rpm））

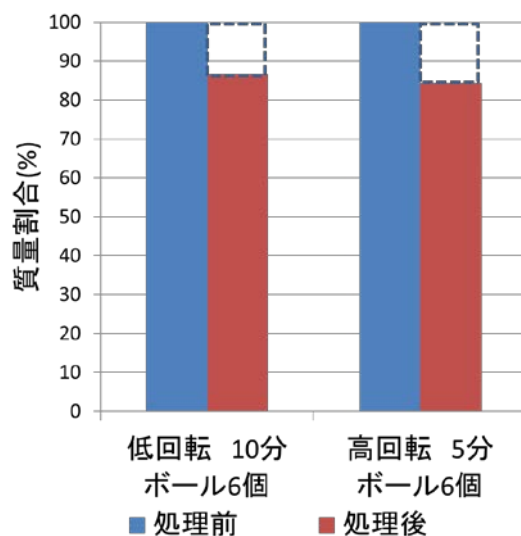


図 6.4.18 ボールミル（ボール 6 個）による粉砕後の超音波分散，分離後の減量

### ③ 微細粒径の分離

山津見と蕨平の土壌各 2kg をそれぞれ 4.75mm, 2mm, 500 $\mu$ m, 250 $\mu$ m, 125 $\mu$ m, 75 $\mu$ m, 45 $\mu$ m の篩で湿式分級後，45 $\mu$ m 以下の濁水に対して分級点が 20 $\mu$ m の T-10 と 5 $\mu$ m の TR-5 の 2 つのサイクロンにより 21~45 $\mu$ m, 6~20 $\mu$ m, 5 $\mu$ m 以下の 3 画分に更に分級して XRD と Cs 線量測定を行った。XRD による鉱物分析の結果，45 $\mu$ m 以下の画分全体には石英や長石などとともに粘土鉱物の存在が認められ，分級点が小さくなるに従いそれらの結晶性の高い鉱物のピークが低減する傾向が見られた（図 6.4.19）。Cs 線量測定の結果，サイクロン分級により山津見は 21-45 $\mu$ m の分画で最も Cs 線量が高い傾向が，蕨平では粒度に寄らずばらつく傾向が見られた（図 6.4.20）。また，Cs137/Cs134 の比率について，山津見と蕨平は平均 4.1-4.3 程度にあるが，いずれも 500 $\mu$ -2mm の粒径画分のみ 5 を超える値となった（表 6.4.1）。本データのみでは何も判らないが，特異な分配や現象とも考えられることから，今後も同位体の比率については確認していく。

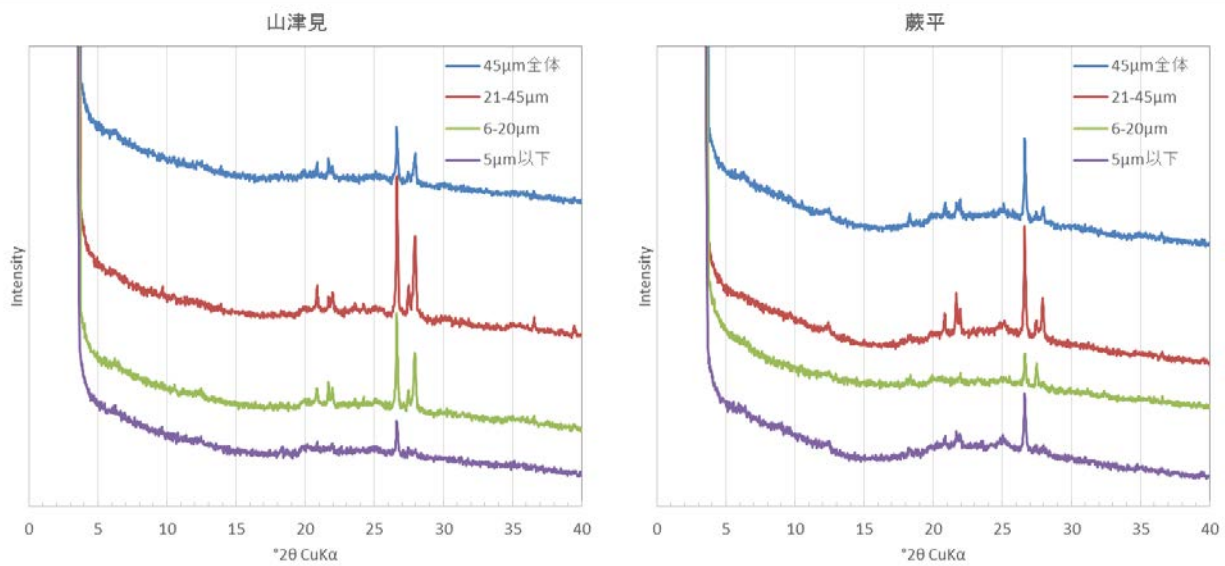


図 6.4.19 45μm 以下の粒径画分におけるサイクロン分級前後の XRD 回折パターン

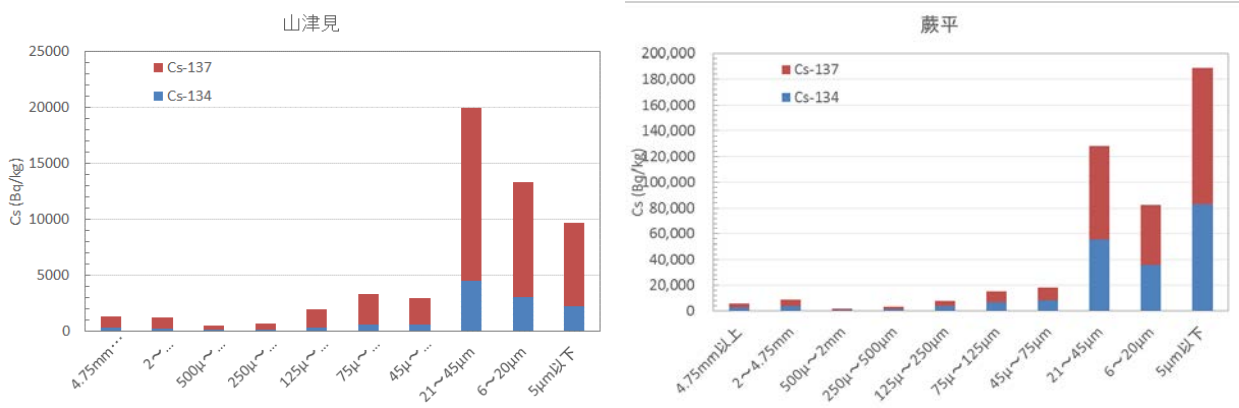


図 6.4.20 山津見と蕨平の各粒径画分における Cs 線量の分布

表 6.4.1 山津見と蕨平の各粒径画分における Cs 線量の分布と Cs137/Cs134 の比率

	山津見				蕨平			
	Cs-134 Bq/kg	Cs-137 Bq/kg	Cs137/ Cs134	T-Cs Bq/kg	Cs-134 Bq/kg	Cs-137 Bq/kg	Cs137/ Cs134	T-Cs Bq/kg
4.75mm 以上	264	1,028	3.89	1,292	561	2,728	4.87	3,288
2-4.75mm	218	956	4.38	1,174	896	3,928	4.38	4,824
500μm-2mm	84	425	<b>5.07</b>	508	159	822	<b>5.16</b>	981
250-500μm	120	513	4.29	633	292	1,386	4.74	1,678
125-250μm	341	1,559	4.57	1,900	778	3,588	4.61	4,366
75-125μm	606	2,702	4.46	3,308	1,424	6,936	4.87	8,360
45-75μm	535	2,369	4.43	2,904	1,768	8,396	4.75	10,164
21-45μm	4,505	15,498	3.44	20,003	16,994	55,566	3.27	72,561

6-20 $\mu$ m	3,032	10,279	3.39	13,311	10,349	35,878	3.47	46,227
5 $\mu$ m 以下	2,189	7,467	3.41	9,656	23,260	82,854	3.56	106,115

④ 長期海水浸漬による抽出

試験中の様子を図 6.4.21 と 6.4.22 に示す。本受託期間中に 2 か月分が経過したが、目的に従った成果を確認するために継続して浸漬中であり、今後、継続した検討を進める予定である。なお、試験操作において、図 6.4.23 に見られるように遠心分離では除去しきれない微粒子がメンブレンフィルターで多く回収されたことから、溶脱に際して最も対象となりうる粘土粒子が試験容器から順次流亡し、試験容器中の Cs 含有粒子の量が減じたことは、試験法の問題と考えられる。今後、より長期の試験を進める際には、カラム試験など、土壌粒子の減じない方法による試験の実施が検討される。



図 6.4.21 試験条件を設定した遠心分離用容器（左）と振とう中（右）の外観

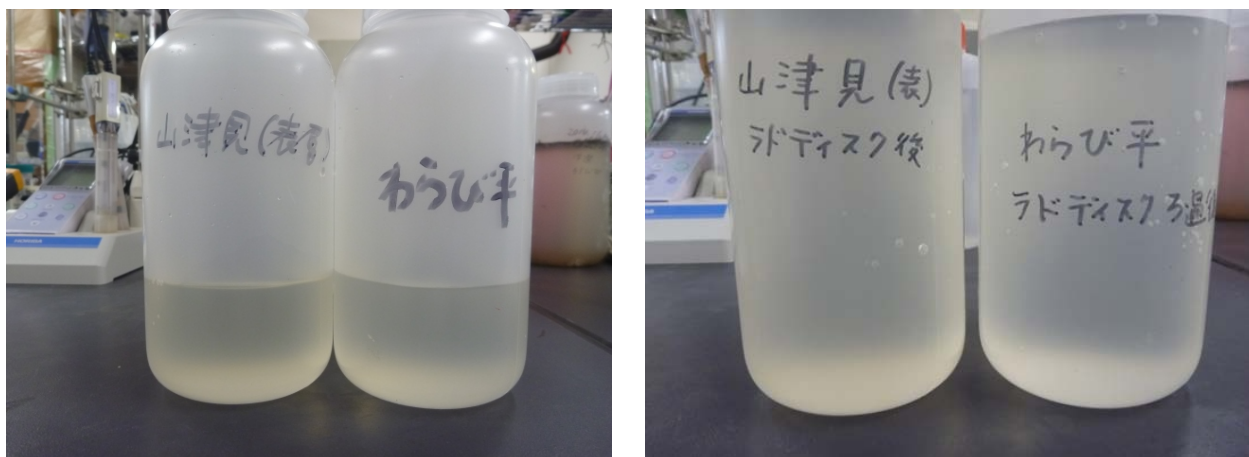


図 6.4.22 メンブレンフィルターろ過後（左）とラドディスクろ過後（右）



図 6.4.23 微粒子の残留するメンブレンフィルター（左）とラドディスク（右）

⑤ 現地調査および支援

本研究で用いた汚染土壌およびコールド試験用の非汚染土壌の採取以外は、本プロジェクトにおける他の研究に関する調査・分析への支援に相当するため、それらの成果についてはそれぞれの担当区分である「6.2 汚染ため池堆積物の特徴の検討」など他章他項に報告されている。

6.4.4.2 技術リファレンス構築のための基礎的検討

検討結果の概要を以下に示す。情報量が多いことから、収集文献の概要と分類の一覧、および検討詳細については巻末資料 1 および 2 とした。

① 放射性物質汚染土壌の減容化に関する情報収集・整理業務

汚染土壌の減容化に関する文献を収集するため、JDreemIII, J-STAGE, CiNii, 国立国会図書館サーチ (NDL Search), J-GLOBAL, 電子図書館 (地盤工学会), 目録・書誌検索 (土木学会), 農業農村工学会誌, 農業農村工学会論文集, 廃棄物資源循環学会誌, 廃棄物資源循環学会論文誌, JAEA 図書館\_JOPSS (日本原子力研究開発機構), JAEA 図書館\_3.11 原子力事故参考文献情報 (日本原子力研究開発機構), 研究成果発表データベース (産業総合技術研究所), 環境放射能除染学会の計 14 のデータベースより, 放射性セシウム, セシウム, 減容, 分級, 洗浄, 焼却, 熔融, 分別のキーワードで検索を行い, 該当する文献を精査してまとめた。表 6.4.2 に収集文献の一覧を示す。また, 各文献の掲載先, 概要, 分類の一覧を巻末資料 1 に示す。

表 6.4.2 収集文献一覧

連番	文献名	
1	あ	亜臨界水熱爆砕法による放射性廃棄物処理

2	あ	亜臨界水熱爆砕法による放射性セシウム除去・減容化技術の開発
3	い	一般焼却飛灰からのセシウム溶出特性に関する研究
4	い	飯舘村蕨平地区における可燃性廃棄物減容化事業について（概要）
5	い	飯舘村における空気揚土攪拌式洗浄装置を用いたセシウム汚染土壌の減容化の実証試験
6	い	茨城県南部土壌のセシウム吸着特性
7	い	飯舘村蕨平地区における可燃性廃棄物減容化事業について－福島県全体の復興のために－
8	え	X線分光法と計算科学による土壌中セシウムの評価
9	お	汚染土壌からのセシウム溶離回収技術の開発(1)全体計画
10	お	汚染土壌からのセシウム溶離回収技術の開発(2)溶離試験
11	お	汚染土壌対策 放射性 Cs 汚染土の浄化・減容化技術の開発－土壌分級・洗浄技術の適用－
12	お	汚染された農地土壌からセシウムを 99% 除去－汚染土壌などの大幅な減容化に期待－
13	お	オゾンを用いた排ガス処理装置付輻射熱熱分解炉による有機物等減容化技術－岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業（平成 25 年度）実証試験結果報告－
14	お	汚染土壌の貯蔵負荷低減のためのセシウム溶出回収処理(3)セシウム溶出回収処理後の線量低減化の計算
15	お	汚染土壌からの放射性セシウムの除去・回収
16	お	汚染水浄化,汚染土壌減容化のキーテクノロジーは固液分離技術（小特集 粒子・流体プロセス部会の最新動向と活動報告：震災復興への粒子・流体プロセス工学的アプローチ）
17	か	画期的なセシウム吸着剤を開発
18	か	界面化学的分散制御高せん断解砕による放射能汚染土壌洗浄 福島県における汚染土壌洗浄処理フィールド試験（第 1 報）
19	か	環境汚染と除染 住民への理解と廃棄物の減容化が課題
20	か	カチオン種の異なる各種ゼオライトによるセシウムイオンの回収と固定化
21	か	乾式 Cs 除去技術で生成する浄化処理物の各種土工資材評価
22	か	家畜ふん堆肥に含まれる放射線セシウムについて
23	か	革新的環境浄化技術の開発 ナノカルシウム鉄による放射性セシウム汚染土壌の乾式除染技術
24	き	期待高まる除染技術実証事業 環境省「除染技術実証事業」の概要
25	き	基礎物性・挙動解析プロジェクト報告
26	く	草木類を含む土壌の熔融処理試験
27	く	空気揚土攪拌式洗浄装置を用いた放射性セシウム汚染土壌の減容化方法の開発
28	げ	現地土壌におけるセシウム固定 復興農学が目指すもの－東日本大震災

		からの復興への貢献と課題ー
29	こ	高温加熱処理による高濃縮汚染残土の高減容化に関する研究 福島県における汚染土壌洗浄処理フィールド試験（第4報）
30	こ	高放射能汚染土壌の界面化学的分散制御高速せん断流解砕洗浄による再生土化
31	こ	湖沼底泥の湿式触媒酸化法による減容化と除染効果
32	こ	耕起した放射能汚染水田を除染するための濁水回収システムを組み込んだ水による土壌攪拌工法の開発
33	こ	高放射能汚染土壌洗浄システムにおける水循環システムの性能評価
34	さ	産業用ゴミ焼却炉を用いた放射性セシウム汚染土壌の減容除染システムの検討
35	さ	最新の土壌・地下水汚染浄化技術 放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化システムの開発 効率的な浄化・減容化と作業員の被曝線量の大幅な低減を可能とした新しい洗浄技術の実用化
36	ざ	雑草繁茂域における植物体および表層土の効率的な除染および減容化方法
37	し	湿式分級洗浄および天然鉱物等による農地土壌等に含まれる放射性セシウム除去方法の実践的検討
38	し	焼却施設における廃棄物減容化と放射性セシウムの挙動
39	じ	除染へ挑戦する建設土木技術
40	じ	地盤環境中の放射性物質の挙動 <特集>汚染土壌・廃棄物等の処理
41	じ	除染作業により除去された土壌等の除去物の仮置場の設計・建設および維持・管理
42	じ	ジオマテリアルを利用した除染
43	じ	磁化 Na-P1 型ゼオライトによる土壌 Cs の除去技術の開発
44	じ	除染除去土壌に対する分級時の洗浄技術の適用性検討
45	じ	除染可燃物焼却灰（飛灰・主灰）の減容固化技術の開発
46	じ	除染廃棄物の減容（2.6） 福島第一原子力発電所事故に係るサイト外緊急時対応の調査及び環境修復活動の検討に関する報告
47	じ	磁気分離による汚染土壌の減容化の試み
48	じ	除染技術選定・評価等業務報告書（平成24年度）ー環境省平成24年度除染技術実証事業(受託研究)ー
49	じ	除染技術～物理分離・分級と土壌添加による低温加熱の有効性 粉体技術のイノベーション
50	じ	事故由来放射性物質汚染廃棄物の熱処理に関するこれまでの研究成果
51	じ	除染除去土壌に対する超音波洗浄装置の適用性検討
52	じ	除染技術の高度化ーセシウムの濃縮分離(放射性物質で汚染された土壌からの熱処理によるセシウム除去) 復興農学が目指すものー東日本大震災からの復興への貢献と課題ー
53	じ	除染廃土の湿式減容技術 復興農学が目指すものー東日本大震災からの

		復興への貢献と課題ー
54	じ	除染技術選定・評価等業務報告書（平成 25 年度）ー環境省平成 25 年度除染技術実証事業(受託研究)ー
55	す	スクラビング・フローテーションを用いた土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の効率的な浄化と減容化
56	す	水稲栽培試験田における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (2)水稲栽培試験におけるセシウムの挙動評価
57	す	水稲栽培試験田における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究:(1)試験計画および現地概要
58	す	水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (1)全体計画と現地の概要
59	す	水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (2)放射線測定と汚染状況の評価
60	す	水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (3)荒搔き作業と除染効果の評価
61	せ	洗浄・水処理プロジェクト報告
62	ち	超電導磁石を用いたセシウム汚染土壌の除染に向けた土壌の磁気分離に関する研究
63	ち	超電導磁石を用いた高勾配磁気分離による Cs 汚染土壌の減容化
64	つ	土の粒度分布に注目した放射性物質吸着土壌の減容化に関する検討
65	て	天然鉱物によるセシウムの吸着に関するデータベースの一例
66	で	電気泳動法を利用したカオリン粘土に含有するセシウムの除去に関する実験・解析
67	と	特殊ジオテキスタイル製袋を活用した用水路底質等の脱水減容化ー岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業（平成 24 年度）実証試験結果報告ー
68	ど	土壌の原位置加熱による放射性セシウムの除去可能性の検討
69	ど	土壌からのセシウムの分離
70	ど	土壌へのセシウム吸着機構; 第一原理計算による白雲母のほつれたエッジサイトへの放射性セシウム吸着研究
71	ど	土壌からの Cs 除去を目的とした磁化 Na-P1 型ゼオライトの合成
72	ど	土壌洗浄を用いた放射性 Cs 汚染土壌の減容化と濃縮残渣処理の自動化について
73	ど	土壌中の放射性セシウムの安定性に関する研究 (A20)
74	ど	土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の浄化・減容化および濃縮残渣処理の自動化
75	ど	土壌の浄化・減容技術に関する技術情報
76	ど	土壌細粒分等からの常温常圧下での Cs 容離および容離した Cs の吸着・濃縮による減容化技術ー放射性物質による環境汚染と対策の現状ー
77	ど	土壌洗浄による除去土壌の浄化・減容化ー放射性物質による環境汚染と

		対策の現状ー
78	ど	土壌への放射性 Cs の吸着メカニズム
79	ど	土壌中の放射性 Cs の移動
80	ど	土壌から作物へ、セシウムの移行とその要因
81	ど	道路維持管理に伴い発生する放射性セシウム含有土砂の分級洗浄処理実験
82	な	ナノカルシウムによる放射性セシウム汚染土壌の除染技術
83	な	ナノバブル水を用いた放射性物質汚染側溝汚泥の洗浄減容化実証試験
84	ね	熱処理減容化等プロジェクト報告
85	ね	粘土鉱物からの Cs 吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(3) TR - DXAFS および STXM による粘土鉱物への吸着挙動解析
86	ね	粘土鉱物からの Cs 吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(2)XAFS 法による粘土鉱物の Cs 吸着構造と特異吸着サイトの解明
87	ね	粘土鉱物からの Cs 吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(4)熱処理粘土鉱物におけるセシウム移行挙動の解明
88	ね	粘土鉱物からの Cs 吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(5)第一原理計算が示す粘土鉱物における Cs の微視的吸着機構
89	ね	粘土鉱物からの Cs 吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(1)福島産バーミキュライトによる Cs 吸脱着挙動
90	ね	粘土鉱物ーセシウム相互作用研究の最近の動向
91	ね	粘土鉱物に吸着したセシウムの水相における移行現象
92	の	農地土壌等における放射性物質除去技術の開発
93	は	廃棄物熱処理実験プラントを用いた災害廃木材燃焼時の放射性セシウムの熱分配挙動および溶出特性
94	は	廃棄物・土壌処分技術手法開発等プロジェクト報告
95	ば	BAT(混気ジェット旋回流ポンプ)等による汚染土壌の減容化
96	ば	バーミキュライトを模擬土壌としたセシウム除染条件の検討
97	ば	パルスパワー放電を活用した骨材再利用による汚染コンクリートの減容化
98	ふ	粉碎・選別技術総論
99	ふ	福島県除染技術実証事業 実地試験結果 (平成 23 年度)
100	ふ	腐敗性廃棄物(草本類)の減容化と保管時温度変化に関する検討(速報)
101	ふ	福島第一原子力発電事故で汚染された堆肥の汚染原因と処分方法
102	ふ	福島県除染技術実証事業_実施結果(平成 24 年度第 1 回)
103	ふ	福島県除染技術実証事業_実施結果(平成 24 年度第 2 回)
104	ふ	福島第一原子力発電所事故による汚染土壌からの放射性セシウムの除去と吸着
105	ふ	不燃系等減容化及びコンクリート技術適用プロジェクト報告
106	ふ	福島県の磁性土壌に対する放射性セシウム濃度分析

107	ふ	福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質汚染土壌の減容化手法(1)汚染土壌から分離した放射性セシウム吸着粘土の特性評価
108	ふ	福島県相馬郡飯舘村および双葉郡浪江町における表層土壌中の粘土鉱物の特徴 (A17)
109	ふ	福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務報告書; 除染技術実証試験事業編(受託研究)
110	ふ	福島県除染技術実証事業_実施結果 (平成 25 年度)
111	ふ	一土壌科学者としての考察と新提案ー復興農学の原点を里山の活性に求めてー (特集 復興農学がめざすもの: 東日本大震災からの復興への貢献と課題)
112	ぶ	分級分析による飯舘村農地土壌のセシウム吸着特性および放射性セシウムの分布(口頭発表, 一般講演)
113	へ	平成 23 年度「除染技術実証試験事業」の結果概要
114	へ	「平成 24 年度除染技術実証事業」に係る実証試験対象技術の選定結果及び「平成 23 年度除染技術実証事業」に係る評価結果の公表について
115	へ	「平成 25 年度除染技術実証事業」に係る実証試験対象技術の選定結果及び「平成 24 年度除染技術実証事業」に係る評価結果の公表について
116	へ	「平成 26 年度除染技術実証事業」の対象技術の募集及び「平成 25 年度除染技術実証事業」の評価結果について
117	ほ	放射性セシウム汚染土壌の洗浄処理に関する検討
118	ほ	放射性セシウム含有土壌の分級洗浄処理に関する基礎検討
119	ほ	放射能汚染土壌の土壌洗浄処理の検討
120	ほ	放射性セシウム汚染土壌の多段階土壌洗浄処理
121	ほ	放射性セシウム含有碎石の洗浄処理に関する基礎的検討
122	ほ	放射性汚染物質を含む土壌の洗浄処理に係る基礎的検討
123	ほ	放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化へのマイクロバブルフローテーション法の適用 (第 25 回:震災廃棄物の処理・リサイクルと課題)
124	ほ	放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化ーマイクロバブルフローテーションを利用したアトリクション分級洗浄ー 放射能除染技術
125	ほ	放射性物質による環境汚染の対策技術ー除染除去物の減容化と保管・処分技術ー 放射能除染技術
126	ほ	放射能土壌の高速除染処理システムー放射能粘土質土壌の除染処理と減容化技術ー 放射能除染技術
127	ほ	放射性物質と土壌汚染
128	ほ	放射性セシウム除染と戦略的農地資源保全
129	ほ	放射性物質に汚染された土壌の除染・減容化技術
130	ほ	放射線防護 放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化技術
131	ほ	放射性セシウム含有土壌への酸抽出方法の適用性に関する基礎的検討
132	ほ	放射性物質汚染土壌等からの乾式 Cs 除去技術の開発
133	ほ	放射性物質を含む廃棄物の焼却処理

134	ほ	放射性物質汚染廃棄物の適正処理に向けた課題
135	ほ	放射性物質汚染土壌等からの乾式 Cs 除去技術の開発
136	ほ	放射性セシウム含有バイオマスの減容化に関する研究
137	ほ	放射性セシウムの土壌吸着反応における数値シミュレーション解析の進展
138	ほ	放射性物質を含む下水汚泥の減容化について—福島第一原発事故の影響への取り組み—
139	ほ	放射能汚染土壌の除染・減容化システムの開発
140	ほ	放射性セシウム含有土壌の土壌洗浄法の適用性評価試験
141	ほ	放射性 Cs 汚染土壌の浄化・減容化システム—新しい洗浄技術による効率的な減容化と濃縮残渣処理の自動化による被曝線量の低減化—
142	ほ	放射性物質を含む汚染土壌処理システム及び焼却灰洗浄減容化システム
143	ほ	放射性物質に汚染された土壌の除染・減容化技術—第 2 報—
144	ほ	放射能汚染土砂の分級・減容化実証実験について
145	ほ	放射性セシウムを吸着し含水汚泥を減容化させる除染用土のう—岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業（平成 25 年度）実証試験結果報告—
146	ほ	放射性物質問題—土壌物理に求められること—
147	ほ	放射能汚染土壌の洗浄再生化技術 最新のセンシング/マニピュレーション融合化技術(2)
148	ほ	放射性物質を含む汚染土壌等の洗浄と減容 バイオによる放射能除染への挑戦
149	ほ	放射能汚染植物バイオマス減容化バイオ技術の開発
150	ほ	放射性セシウム汚染土壌の減容化(その 1:化学的除染)
151	ほ	放射性セシウム汚染土壌の減容化(その 2:表面剥離の試み)
152	ほ	放射能汚染土砂の分級・減容化実証実験について
153	ほ	放射性セシウム含有土砂への土壌洗浄技術の事前適用性評価試験—道路維持管理に伴い発生した土砂の減容化に向けて—
154	ほ	放射性汚染物質の減容化に伴うセシウム排出挙動実証試験
155	ほ	放射性汚染物質の減容化に伴うセシウム排出挙動実証試験
156	ほ	放射性物質の固定化・減容化同時処理技術の実証
157	ほ	放射性物質汚染土壌の小型簡易設備による減容化技術の開発
158	ほ	放射性 Cs の土壌粒度別分布傾向と分級による減容化への取り組み
159	ほ	放射性セシウム汚染土壌の分級分析による減容化と農業用堰の受動的処理効果の検討
160	ほ	放射性セシウム汚染土壌の減容化
161	ほ	放射性物質含有下水汚泥（指定廃棄物）の減容化実証事業（減容化処理の完了）中間報告
162	ほ	放射能汚染土壌洗浄処理における高濃縮汚染残土固形化処理性能評価

163	ほ	放射性物質を含む作物残さ・雑草、枝葉等の安定・減容化技術
164	ぼ	ボールミル法による土壌中からのセシウムの除去
165	よ	溶融塩法によるセシウムの土壌から水溶液中への抽出
166	よ	溶融塩法による土壌からのセシウムの抽出 資源・素材開発技術の展望

情報収集と整理の結果、減容化に関する技術としては、①分級、②洗浄、③焼却、④溶融の4種類に分類された。減容化は、仮置場から中間貯蔵施設に運搬され、土壌貯蔵施設Ⅰ型ないしはⅡ型に保管される前、あるいは中間貯蔵後に実施されることが想定される。技術分類の中で、①と②については、処理後により一部を有用物として分離することが前提となる。しかし、再利用については制度設計上、未だ従来のクリアランスレベル 100Bq/kg とされており、一部、コンクリートガラなどの建築廃材の土木工事等への利用において 3,000Bq/kg という指標がある。これを踏まえると、減容化の技術開発およびそのための科学研究の方向性としては、分類①②における再利用化可能な処理方法の検討、③④での処理プロセスについての科学的検証、長期保管時における安定性を担保する検証などを主流として、安全・安心を基軸に技術リファレンスを構築していくことと考える。

#### ② 放射性物質汚染土壌の減容化に関する情報解析業務

収集した情報をもとに、情報の発信方法について検討した。詳細については巻末資料2に示す。情報発信には、インターネットを通じた公開、配信が利便性も高く有効と考えられる。イメージを図 6.4.24 に示す。

# 放射性物質汚染土壌の減容化に関する技術情報

HOME

減容化技術

技術情報

関連情報

基礎知識

用語解説

FAQ

リンク



新着情報

〇月〇日：〇〇〇〇

トップページのイメージ

放射性物質汚染土壌の減容化に関する技術検討委員会（仮）

所在：〇〇

コンテンツの一覧

〇〇    〇〇    〇〇

セキュリティポリシー

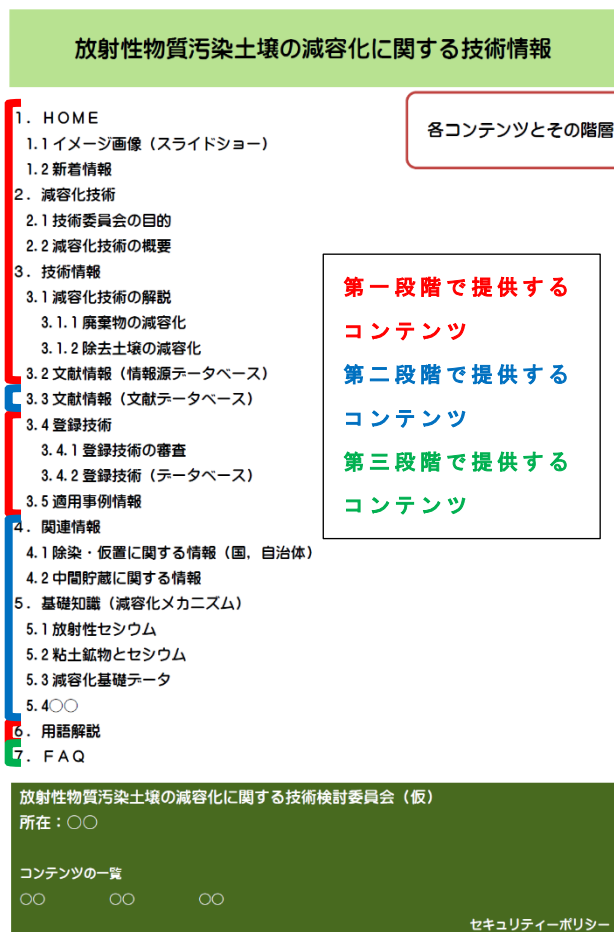


図 6.4.24 技術リファレンス掲載 Website のイメージ

また、その発信手法や在り方、背景には以下のような課題や留意点、進め方が考えられる。

【体制・システム等に関する検討事項と留意点】

1) 情報公開のサイト

情報公開のサイトは、独立性の観点から新たにドメインを取得主する（例えば、○○フォーラムのような NPO 組織を創設して）ことが最も好ましいが、当面の維持管理を想定すると、公平性の高い研究機関（例えば、日本原子力研究開発機構など）の HP にリンクすることが考えられる。

2) 情報公開に向けた組織体制等の構築

減容化技術情報を公開する上では、行政等への情報提供も意図していることから、責任のある組織を構築する必要がある。また、HP を維持・管理するための要員を確保する必要もある。特に、技術を募集し、それを登録する技術登録制度を立ち上げた場合、その評価に関する要員（有識者委員会）の確保なども含め、運営体制（複数人の専従事務局員）および運営資金の確保が必要となる。

3) 瑕疵責任

公開情報が技術情報であり、使用にあたっての瑕疵に関する責任等の所在についても十分に検討し、その旨を、情報公開する HP などで明確にしておく必要がある。

#### 4) 掲載技術情報の信頼性

瑕疵責任にも関連するが、特に、コストに関する信頼性の責任の所在を明確にしておく必要があるとともに、基本的にプラントが必要となる可能性が高いことから、コストは想定される処理規模に大きく左右されることになることから、ニーズに関する想定を十分に行っておく必要がある。

#### 5) 技術基準の明確化

公開情報を何時、誰が、どのような場面で使うことになるのかを明確にするとともに、減容化のメリット、デメリット（特に除去土壌について）および、その判断方法（事前調査方法）についても検討しておく必要がある。たとえば、分級・洗浄による減容化手法は、比較的低コストで実施可能な技術であることから、最も多く検討が行われている。しかし、減容化により生じた非汚染土を利用することができなければ、技術を適用する価値が無くなってしまう。非汚染土の定義（品質基準）および流用方法についても明確にしておく必要がある。

#### 6) 除染・減容化計画との整合性

現段階で公表されている計画では、2015年3月11日からパイロット事業として中間貯蔵が開始され、2016年度以降、本格的な中間貯蔵が実施される予定となっている。一方、中間貯蔵時に実施される減容化については、可燃性廃棄物のみであり、除去土壌については特に明確になっていない。減容化情報を発信していく上で、それが計画上のどのプロセスで有効であるかも示す必要がある。

#### 7) 既存情報の公開とアップデート

減容化技術が適用された事例を公表していくことも重要であり、減容化実施サイト情報、適用事例の概要を逐次アップデートする必要がある。なお、減容化に関する留意事項（トラブル事例）についても FAQ 等を用いて公開することが望ましい。

### 【以上を踏まえた、平成 27 年度以降の方針と進め方の案】

#### 8) 既存情報の公開とアップデート

減容化技術が適用された事例を公表していくことも重要であり、減容化実施サイト情報、適用事例の概要を逐次アップデートする必要がある。なお、減容化に関する留意事項（トラブル事例）についても FAQ 等を用いて公開することが望ましい。また、平成 27 年度は、パイロット事業として中間貯蔵が開始されることになっており、減容化技術の普及・啓発は、早期に開始することが好ましい。しかし、前述したように減容化により発生した非汚染土壌の定義が難しいことから、減容化技術の普及には課題点も多いことにも留意が必要となる。

#### 9) 試験的公開の時期

HP（第一段階）については、平成 27 年度 2/4 半期を目途に試験公開し、利用者等の関心度を把握することが好ましい。この時点におけるデータベースは、情報源情報として表形式の一覧表で問題ないと考えられる。ただし、平行して技術情報（公刊文献）のアップデートを行う必要がある。また、第二段階の内容について、平成 27 年度末公開を目標に構築することが、除染・減容化事業全体の速度感とのズレをきたさないリミットの一つと考えられる。

#### 10) HP 公開サイトの検討

最終的には、1), 2)の通りであるが、試験公開のサイトとしては、本プロジェクト所属機関のサーバーを一時的に用いることが好ましい。研究成果の公開や情報発信に対して前向きであり、実施担当者の申請と裁量による開設、設置、運営が比較的容易な大学研究機関が適当とも考えられる。この場合、本プロジェクトに関する既設の HP 等にリンクを設定することで、広くアクセスが可能になる。

#### 11) HP 公開運営体制の構築

既存技術の公開のために技術登録の制度などを設ける場合は、技術評価の方法、評価要員（有識者委員会）の検討、および運営体制（複数人の専従事務局員）および運営資金の確保を検討する必要がある。ただし、評価などは行わず、既存技術を論文や実施例などの公知情報に基づき自主的にあげる場合は、その選定経緯等を明確にする運営委員会の設置のみでもよいと考えられる。他省庁等の公開の在り方との兼ね合いにもなるが、まずは後者の方法が良いと考えられる。

#### 12) 平成 28 年度以降の方針案

平成 28 年度は、本格的な中間貯蔵の開始が見込まれており、技術の公開については始められることが好ましい。また、減容化技術については、フォールアウトした放射性 Cs 以外の核種による高濃度放射性物質汚染土壌（福島第一発電所周辺）について検討を開始することが望ましい。

### 6.4.5 検討のまとめ

今年度の検討の結果から、バルク試料での試験分析により、粘土鉱物への Cs の明らかな濃集が確認できた。一方で、粗大粒径画分中の大きな粘土鉱物については、濃度が高いが含有量が少ないため大きな問題ではなく、むしろ団粒と有機物の除去が課題となることが示唆された。その粗大粒径画分については、資源工学分野の粉碎等による処理で濃度低減できる可能性を見いだすことができた。

技術リファレンス構築に向けた検討については、本年度より着手したが、現行技術の分類と来年度以降の具体化に向けた大まかな枠組みと課題、留意点をつかむことができた。

## 6.4.6 今後の課題

### 6.4.6.1 分級・分離の高度化について

減容化においては、これを具体化するには粗大粒径画分の再利用の実用化の点につ  
きる。そのためには、土壌の種類を選ばず、粗大粒径画分の Cs 線量低減の改良が重  
要といえる。これについては、引き続き粉碎や分散に関する多分野の技術を導入して  
Cs 汚染土壌に適した方法論を検討していく。また、不沈や磁選などの選別的分離も  
検討していく。そのために、土壌粒子の比重による分離やそれら特性により分別され  
た粒子間の Cs 分配傾向などについても要素検討的に進める。こうした検討を踏まえ  
て、合理的かつ科学的に正しい除染・減容プロセスとして、表 6.4.3 に上げるような  
プロセス段階別に個々の技術を、分類・整理して組み合わせたフロー、システム（要  
素を組み合わせた思考モデル）の開発を進める。また、表 6.4.4 に示すように、その  
ために必要な基礎データの確認を含めた要素検討を行う。

表 6.4.3 分級・分離の高度化に向けた手法の分類の例

	処理	発展の方向性	工夫・手法（例）
前 処 理	分散・洗浄	分離性向上	せん断力、超音波、ナノバブル・マ イクロバブル・混気・曝気、分散剤
	除去	有機物除去	乾燥、焼却
	剥離	粒子表面からの脱離	スクラビング・研磨
粗 ↑ 分 離 ↓ 細	分別	粗い粒径の分級	フルイ、フローテーション、etc
	分級	微細粒子（粘土）の分離	サイクロン、静電気
	磁気分離	特定（磁性）粒子の分離	超電導（1.6~3.5T）、高勾配、吸着体 （乾式・湿式）併用
	抽出	Cs 分離	化学抽出、電気泳動、水熱処理
	昇華	Cs 分離	熔融（1300℃+熔融塩、低温）

表 6.4.4 手法に関する要素的検討課題の例

	処理	発展の方向性	要素（各種粒子に対して）
前 処 理	分散・洗浄	分離性向上	粒径、比重、形状、表面物理化学特性（電 荷、凝集性）、多様性 etc
	除去	有機物除去	有機物含有粒子と粘土粒子の差異
	剥離	粒子表面からの脱離	粒子内分布（表面・内部）、物理強度、 溶解度

粗 ↑ 分 離 ↓ 細	分別	粗い粒径の分級	粗大粒子表面の鉱物特定、付着メカニズム
	分級	微細粒子（粘土）の分離	粒径、膨潤性、凝集性、形状
	磁気分離	特定（磁性）粒子の分離	磁性
	他		融点、溶解度、他

#### 6.4.6.2 技術レファレンスの確立に向けた検討について

先の 6.4.4.2 に挙げた課題を踏まえて、平成 27 年度中にプロジェクト内で試験的な Website を立ち上げて検討する方向で進めていく。

#### 6.4.7 参考文献

- 1) 中間貯蔵施設等福島現地推進本部(2013) 除去土壌等の中間貯蔵施設の案について(概要版), 2013.12.14. ([https://josen.env.go.jp/soil/pdf/draft\\_outline\\_131214.pdf](https://josen.env.go.jp/soil/pdf/draft_outline_131214.pdf))
- 2) 伊藤健一, 宮原英隆, 氏家亨, 武島俊達, 横山信吾, 中田弘太郎, 永野哲志, 佐藤努, 八田珠郎, 山田裕久(2012) 湿式分級洗浄および天然鉱物等による農地土壌等に含まれる放射性セシウム除去方法の実践的検討, 日本原子力学会誌, 11(4), 255-271.
- 3) Mukai, H., T. Hatta, H. Kitazawa, H. Yamada, T. Yaita, and T. Kogure (2014), Speciation of radioactive soil particles in the Fukushima contaminated area by IP autoradiography and microanalyses, Environ. Sci. Technol., 48, 13053-13059, DOI: 10.1021/es502849e.
- 4) 原子力災害対策本部(2013) 福島県内における公共工事における建設副産物の再利用等に関する当面の取扱いに関する基本的考え方, 2013.10.25. ([http://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima\\_byproduct131025a.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima_byproduct131025a.pdf), [http://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima\\_byproduct131025b.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima_byproduct131025b.pdf))
- 5) <http://www.obayashi.co.jp/chronicle/database/d15.html>
- 6) 国立環境研究所(2014) 放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分(技術資料:第四版)改訂版,第4章放射性セシウムの溶出特性, 32-61, 2014.4.14. ([http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo\\_r4\\_140414\\_4-5.pdf](http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_r4_140414_4-5.pdf))
- 7) 日本原子力研究開発機構(2013) 平成24年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書, 3.放射性物質の分布状況変化モデルの高度化に向けた調査研究, 3.2自然環境中における放射性物質の移行メカニズム調査の結果(放射性物質の移行状況の確認結果) (<http://133.188.30.97/initiatives/cat03/pdf05/03-2.pdf>)

## 7. まとめおよび今後の課題

プロジェクト研究チームは、独立行政法人物質・材料研究機構を中心として、国立大学法人北海道大学、国立大学法人東北大学、公立大学法人首都大学東京、学校法人金沢工業大学、国立大学法人宮崎大学、独立行政法人産業技術総合研究所の5大学・2独法から構成された。

研究チームは、福島原発事故で喫緊の課題となっている環境中の放射性物質の汚染除去を実現するために、特に既に大量に環境中に飛散しているにもかかわらず、半減期が長く、経時による減少が見込めない放射性Csを主たる対象として計画を進めた。具体的には、以下の2つのサブテーマ「先端的ナノ材料科学による放射性元素の粘土鉱物への吸脱着機構の解明とその可視化イメージング」及び「精密合成鉱物・天然鉱物への放射性元素の化学的・バルク状態での吸脱着機構解明および汚染廃棄物減容法の開発」を設定し、放射性物質の粘土鉱物などへの吸着挙動解明により、汚染土壌の減容方法の開発、および除染指針策定に資することを目的として推進した。

具体的には、上の2つのサブテーマのもとに、「Cs特異吸着サイトのナノ材料科学による検討」、「粘土鉱物へのCs吸着の理論的アプローチ」、「精密合成鉱物・天然鉱物への放射性元素の化学的・バルク状態での吸脱着機構解明」、および「実汚染土壌の特徴およびその吸着・除去・減容の検討」の課題を設定し委託研究を進めた。

以下、各研究の「まとめおよび今後の課題」を再列記する。

### 7.1 Cs特異吸着サイトのナノ材料科学による検討

#### 1) TOF-SIMSを用いた粘土鉱物への安定Cs吸着状態の可視化

Csを選択的に吸着すると考えられている粘土鉱物バーミキュライトに安定Csを吸着させたCs-バーミキュライト系の試料に関して、TOF-SIMSでは0.1ppmまでのCsの検出が可能であることがわかった。また、バーミキュライトへのCs吸着に関して層間に水分子層と陽イオンが挟まっていることで、大きなイオン半径を持つCsイオンであっても容易にイオン交換される事が明らかとなった。この層間にいったん入ってしまったCsイオンが果たして、様々な環境下で長期間出てこないことが保証されれば、Csを吸着したバーミキュライトは天然の吸着材料として見る事が可能と思われる。この予想が妥当かどうかは、もう少し、実験例を増やすことは言うまでもない。

今後の課題としては、以下の内容を早急に検討するつもりである。

- (1) TOF-SIMSにおけるCsの定量性評価を他のナノ評価法と組み合わせる事によって確立する。
- (2) ガススパッタによって、Cs吸着バーミキュライトを用いて、吸着状態ばかりでなく、吸着・脱離過程でのCs三次元可視化を試みる。
- (3) IPオートラジオグラフィとXRD, SEM-EDS, TOF-SIMS等を組み合わせることで、実際にどの粘土鉱物にごく微量の放射性Csが吸着しやすいかの研究を進展させる。

#### 2) 分析電子顕微鏡を用いたCs安定吸着サイトの探索

溶媒にK<sup>+</sup>イオンを含まない環境下でも、TiとCsの分布に相関が見られた。これにより、バーミキュライトの膨潤層において、わずかなTi濃度の違いが、Cs, Kの吸

着選択性が入れ替わるのみならず、元来、Ti, K, Fe の濃度によって Cs 吸着特性に違いが生じていることが明らかとなった。

この原因として、層間電荷の違いに伴う分極率の相違が、膨潤層に取り込まれるイオンの吸脱着特性に影響をおよぼしていること、もしくは、 $Fe^{2+}$ ,  $Ti^{4+}$  のイオン半径の違いによる構造緩和で、層間イオンの安定性が変化することなどが予想される。

今後、実際の福島産土壌において、微量元素がどのように分布しているのか、調べる必要があるだろう。

これまでの実験は、福島における実際の Cs 濃度に比べ、桁違いに高い濃度で吸着させた場合の結果である。より低濃度になったとき、フレイドエッジのような特定の安定吸着サイトがあらわになるのかどうか興味深いところであるが、より高感度の検出器の導入が必要となる。

### 3) X 線技術による Cs-バーミキュライトの検討

セシウム吸着バーミキュライト等についてこれまでに得られた X 線データをもとに、セシウム吸着メカニズムと構造の関連を検討するうえで留意すべき事項の整理を行った。海外の先行研究と比べて大筋においては違わない結果が得られながら、より進んだ、より定量的な解析を行うには、多くの障害がある。おそらく、その 1 つのキーワードは化学組成および構造の不均一性である。これらをひとまとめにした「平均」と見なすことによる限界がいろいろな形で現れることになる。このため、1 つの重要な方向は、空間分解能を持つ分析技術、特に X 線イメージングの活用が重要である。その場合でも、情報は 3 次元的ではないことや、定量解析にはいくつもの前提があることに留意する必要がある。他方、上記の懸念は、適切に選ばれているという条件がつくが、**well defined** なモデル試料を多くとりあげ、詳しい定量的な検討を行うことによってもある程度救済することができる。おそらく、このような点は本プロジェクトを運営する人々の叡智により解決されうる点であろう。

これまで検討を行ってきたバーミキュライトと比較する問題意識を持って、粘土学会標準試料「クニピア」(天然モンモリロナイト、クニミネ工業) および、層状ケイ酸ナトリウム (アイラアイト) のセシウム吸着を調べた。

おそらく東京理科大の発表した研究のように、今後の分析では、蛍光 X 線スペクトル、X 線回折、XAFS (透過法、蛍光 X 線法) のいずれも、1 ミクロン以下のビームを使って、数~10 ミクロン程度の視野の中での不均一分布を見るのが重要と考えられる。実試料に近いものについて、特にそのような観点を強調する必要がある。その際、迅速なイメージング技術の利用も重要になるだろう。他方、それだけで、まったく未知のメカニズムが解明されるとは想像しにくい。適切な **well defined** なモデル試料 (純物質、単相であること等は当然として、結晶方位や欠陥分布も制御) を最新の解析技術で検討する努力が求められる。X 線技術について言えば、通常の X 線回折、それも指紋法の域を出ないような解釈にとどまる検討ではなく、吸着サイトの位置決定なども含めた精密解析を視野に入れなくてはなるまい。

### 4) ESR 法による Cs-スメクタイトの検討

粘土鉱物は、長寿命放射性核種、例えば 137-Cs, 90-Sr, 129-Ag などを冷却水中から分離する吸着材として注目されてきた。粘土鉱物は、また核分裂生成物が地下水等への環境水へ移行するのを抑制・防止するためのバリアー材としても注目されてきた。しかしながら、放射性陽イオンの粘土鉱物中での存在状態、化学的安定性に関する知識は十二分とは言えない。特に粘土鉱物の層間の陽イオン交換サイトに異なる陽イオン種が共存した場合の陽イオンの競合・選択性については不明な点が多い。

このような背景のもと、 $\gamma$ 線照射後のスメクタイト中の Cs および Ag の存在状態を ESR 法により検討した。その結果、Na イオン, Ag イオン, および Cs イオンを含むサポナイトにガンマ線照射を行うことにより得られる常磁性化の違いは、粘土鉱物サポナイト中でのそれぞれのイオンの専有席を特徴づけるのに有用な方法の一つと考えられる。

## 7.2 粘土鉱物への Cs 吸着の理論的アプローチ

### 1) イオン交換に伴うモンモリロナイトの膨潤挙動の変化

NH<sub>4</sub>イオンモデルやNH<sub>4</sub>モンモリロナイトの初期構造に検討すべき課題はあるものの現時点で得られた知見として以下の2点を挙げる事ができる。

1. NH<sub>4</sub>イオンはHがモンモリロナイト表面のOと水素結合をするため、結合に方向性があり、安定配置がK<sup>+</sup>イオンとは異なる。

2. 混合エンタルピーの極小値が、K型と比較して少ないnH<sub>2</sub>Oにあるので、NH<sub>4</sub>型のモンモリロナイトはK型よりも低相対湿度で膨潤しやすい。

2の知見は湿度制御X線回折の実験結果と調和的である。

今年度はNH<sub>4</sub>イオンの原子間相互作用モデルの開発から取組み、層電荷0.5のモンモリロナイトについて、その膨潤挙動をMD計算から評価した。今後は、水無しのNH<sub>4</sub>型モンモリロナイトの構造の検討および、NH<sub>4</sub>イオンモデルの改良を実施し、これらモンモリロナイトの膨潤挙動を原子スケールから理解することを目指す。

## 7.3 精密合成鉱物・天然鉱物への放射性元素の化学的・バルク状態での吸脱着機構解明

### 1) 合成バイデライトー白雲母系粘土鉱物のCsの吸着挙動

放射性セシウムの粘土鉱物への詳細な吸着メカニズムを解明するために必須である「標準物質」としての合成粘土鉱物について検討した。化学組成・層電荷・結晶度を精密に制御した合成粘土鉱物として、二八面体型粘土鉱物（バイデライトー白雲母系合成鉱物）を水熱条件下で合成し、そのXRD分析による特徴づけと、そのCs吸着挙動を検討した。層電荷が比較的低い、所謂スメクタイト相においても高Cs吸着率が二八面体型粘土鉱物において確認できたことは、高性能Cs吸着材の開発、さらには天然土壌に置くみられる二八面体型粘土鉱物におけるCsの特異吸着挙動の解明への標準試料としての可能性を示唆している。

先端的分光分析、TEM、SIMS等による検討、さらに吸着脱離検討特にホット試験用サンプルとしての標準試料は必須と考えられる。

標準試料の今後の課題としては、

- ① 合成試料では二八面体型粘土鉱物（バイデライトー白雲母系合成鉱物）に関して、その層電荷・結晶性等の制御に成功しており、試料配布は十分に期対応できる。
- ② いわゆる二八面体型パーミキュライトの合成には成功していない。合成条件の再検討が必要と考えられる。
- ③ Cs 特異的な不可逆吸着サイトについて、ある特定の構造・サイト（所謂フレイドエッジサイトなど）が指摘されている点に対して、人工的な特異サイトの創製の検討も必要と考える。この点については、所謂フレイドエッジサイトの成り立ちに対しての粘土鉱物の組成依存性（八面体イオンの Ti もしくは Fe などの部分置換など）を考慮した合成試料を検討すべきと考える。

## 2) 風化黒雲母の Cs の吸着挙動

放射性セシウムの粘土鉱物への詳細な吸着メカニズムを解明するために必須である検討すべき「標準物質」の一つとして風化黒雲母について検討した。変質度・風化度の異なる天然パーミキュライトに関しては、福島県田村郡小野新町周辺にて採集した試料に注目した。その粘土鉱物学的特徴づけがと、その変質度・風化度と Cs 吸着特性との相関を検討し、その標準試料としての適用の可能性を明らかとした。先端的分光分析、TEM、SIMS 等による検討、さらに吸着脱離検討特にホット試験用サンプルとしての標準試料は必須と考えられる。標準試料の今後の課題としては、化学組成・層電荷・結晶性を精密に制御した合成試料に加えて、福島県田村郡小野新町周辺での天然風化黒雲母に引き続き、報告はあるがその詳細がまだ不明である福島県石川町・浅川町での探索も進め、標準試料への適用を検討する。一方で、天然試料の特徴づけの技術レファレンスの構築も進める。

## 3) 変性天然粘土鉱物における Cs 吸着特性脱着挙動の検討

結果から以下のことが判明した

1. 様々な粘土鉱物において、ナトリウムイオンに交換した場所はセシウムイオンに対して有効な吸着点となる。
2. 吸着したセシウムイオンは、カリウムイオンと同じように粘土シート上に酸素原子からなるヘキサゴナルポケットに収まる事で層間を閉じて吸着する。

粘土鉱物の種類によって層間の閉じやすさが異なり、セシウムイオンの吸着量や吸着力が粘土鉱物の構造や組成に由来する負電荷に支配されている事が示唆された。

電荷密度の異なる様々な粘土鉱物の Na<sup>+</sup>置換を行い、各改変粘土鉱物の Cs<sup>+</sup>吸着率と構造上の性質の違いとの関係性を評価した結果、Cs<sup>+</sup>吸着率と空孔数に対する負電荷数の比との関係性から、粘土構造に由来する Cs<sup>+</sup>特異的吸着挙動の足がかりを得る事ができたといえる。しかし、本実験に用いた粘土鉱物試料は殆どが天然物のため組成が安定しない、また狙った領域にくると予想される粘土鉱物を実際に用いるために探索するのは困難といったいくつかの欠点がある。

一方、水熱合成法を用いる事で平均負電荷間距離の異なるサポナイトを合成する

事が可能であり。合成サポナイトは原料仕込み比を変化させる事で想定した組成を持つサポナイトを合成できるため、Cs<sup>+</sup>吸着率と空孔数に対する負電荷数の比との関係性をより定量的に評価できる可能性がある。

#### 4) ゼオライト系鉱物中の Cs および Sr 吸着・不溶出化・長期安定性に関する検討

本研究により、以下の結果が得られた

- ・天然ゼオライト及び石炭飛灰からアルカリ水熱処理して得られたアナルサイム系ゼオライトは Cs<sup>+</sup>の水熱処理過程での保持能が高く、高い溶液安定性を示す。

- ・天然 CLI に HA を形成した複合体を用いることで Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率的な回収が可能である。また 1100℃以上の焼成により、長石や石英などに相変化（安定鉱物化）し、水溶液中への溶出を抑制できる。

- ・常圧下において 1200℃で焼結した Cs<sup>+</sup>吸着 MOR/HA 複合焼結体は、セメント固化したものと比較して高い溶液安定性を示す。

以上の結果はゼオライトによる放射性 Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収と長期安定化に関する基礎データとして利用が期待できる。

本年度はゼオライト転換を利用した Cs<sup>+</sup>の安定化、天然 CLI/HA 複合体による Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収と安定化、及び天然 MOR/HA 複合焼結体による長期安定化に関する基礎データを収集した。ゼオライト転換に関しては Si や Al を含有する焼却灰（枯れ葉を燃焼）においても有効であることが明らかになっているため、今後焼却灰や様々な土壌のゼオライト転換の検討を行い、実用的な研究へと発展させる。天然 CLI/HA 複合体による Cs<sup>+</sup>と Sr<sup>2+</sup>の効率回収と安定化に関しては、長期安定固化（アパタイト固化等）に関する適用を検討する。天然 MOR/HA 複合焼結体による長期安定化に関しては、焼結温度依存性や XRD による構造評価を行い更なる安定性向上に向けた最適化を行う。

#### 5) 低結晶質粘土鉱物・非晶質物質における Cs 吸着特性脱着挙動の検討

### 7.4 実汚染土壌の特徴およびその吸着・除去・減容の検討

#### 1) 寄洲堆積物および津波堆積物における放射性セシウムの垂直分布

阿賀野川下流域と移川下流のダム付近寄洲堆積物における放射性 Cs について昨年に引き続き、検討を進めた。両地点とも寄洲堆積物における粘土含量当たりの放射性 Cs 濃度は原発事故直後と見られる時期に高く、その後は次第に低下する傾向であった。その傾向は河川を流下する微粒子を集めて排出される浄水場発生土の放射性 Cs 濃度の時間変化にも認められた。阿賀野川下流域の阿賀野川浄水場と満願寺浄水場では、原発事故後早い時期の取水に由来する発生土で高い濃度が観測されたが、その後は低下し、高い値は観測されていない。また、砂サイズの黒雲母風化物には移川ダムの下層でのみ放射性 Cs が明らかに検出されたが、その他の層の放射性の検出は極めてわずかで、一旦粘土粒子等に保持された放射性 Cs が河川内の他の土壌粒子との間で均一化する度合いは小さいと見られた。そして、放射性 Cs 濃度の高い黒雲母風化物には大気からの直接沈着したか、または雪の上に沈着したものが直接黒雲母風化物と接触したの

ではないかと推察された。

宮城県沿岸部の津波堆積物とその下の残存土における放射性 Cs の垂直分布を県南ぶから亘理-山元，名取，仙台に渡って 17 地点で測定した。再表層の泥質堆積物の放射性 Cs 濃度が高く，残存土ではほとんど検出されない場合が多かった。原発事故地点に近い亘理-山元では名取，仙台より泥質堆積物の放射性 Cs 濃度が高い傾向であった。また，泥質堆積物の垂直断面における放射性物質の濃度は斑点状に高い場所と層状にごく薄く存在する部分があり，沈着した放射性セシウムの形態に 2 種類あることが示唆された。

泥質津波堆積物に含まれる放射性 Cs の形態として，微粒子として沈着した見られるものと薄く層状に分布するものと少なくとも 2 種類あることについて，水平分布等を検討しながら確認を進める必要がある。また，微粒子として沈着したと見られるものが土壌からどの程度濃縮分離できるものかどうか，その結果が除染で出る放射性物質濃度の高い土壌の減容化にどの程度寄与できるかどうか推測する。

## 2) ため池堆積物の放射性 Cs 含量とその分布 汚染ため池堆積物の特徴の検討

福島県飯舘村役場周辺のため池 6 箇所において，ため池底土のコアサンプリングを行い，深度方向の放射性 Cs の濃度分布について測定を行った。

## 3) パッシブ除染に適する天然材料の最適化・除染現場への適用検討

本研究では，パッシブ除染における細粒な溪流懸濁粒子を捕獲するために焼成珪藻土を溪流に設置する必要がある。そこで，先行して精力的に検討が進められている鉦山廃水のパッシブトリートメントで採用されている石灰岩の設置状況を調べその設置例の写真や概念図を検討した。今後はこれらの設置例を参考に，焼成珪藻土の最適な設置方法をさらに検討する。

焼成珪藻土は粘土画分におけるバーミキュライトやカオリナイトだけを選択的に回収できている可能性が示されたが，どの粒径の粒子をどれだけ捕獲できるかについて定量的なデータを取る必要がある。今後は，鉦山廃水のパッシブトリートメントで設置されている石灰岩の設置方法を参考に，設置条件の最適化を図る。

## 4) 高度分級技術の要素抽出・減容化基盤技術の検討

今年度の検討の結果から，バルク試料での試験分析により，粘土鉱物への Cs の明らかな濃集が確認できた。一方で，粗大粒径画分中の大きな粘土鉱物については，濃度が高いが含有量が少ないため大きな問題ではなく，むしろ団粒と有機物の除去が課題となることが示唆された。その粗大粒径画分については，資源工学分野の粉碎等による処理で濃度低減できる可能性を見いだすことができた。

技術リファレンス構築に向けた検討については，本年度より着手したが，現行技術の分類と来年度以降の具体化に向けた大まかな枠組みと課題，留意点をつかむことができた。

減容化においては，これを具体化するには粗大粒径画分の再利用の実用化の点につける。そのためには，土壌の種類を選ばず，粗大粒径画分の Cs 線量低減の改良が重要

といえる。これについては、引き続き粉砕や分散に関する多分野の技術を導入して Cs 汚染土壌に適した方法論を検討していく。また、不沈や磁選などの選別的分離も検討していく。そのために、土壌粒子の比重による分離やそれら特性により分別された粒子間の Cs 分配傾向などについても要素検討的に進める。こうした検討を踏まえて、合理的かつ科学的に正しい除染・減容プロセスとして、プロセス段階別に個々の技術を、分類・整理して組み合わせたフロー、システム（要素を組み合わせた思考モデル）の開発を進める。また、そのために必要な基礎データの確認を含めた要素検討を行う。

## 8. 成果の外部への発表

### 8.1 学会発表（国内会議）

- ① 三留正則、長谷川琴音、山田裕久「粘土鉱物中の Cs 安定吸着サイトの探索」  
日本顕微鏡学会第70回学術講演会、幕張
- ② 高木慎介・石田洋平・嶋田哲也，ナノシート材料の特異な複合体形成挙動，公益社団法人日本セラミックス協会 第27回秋季シンポジウム（依頼講演）
- ③ 高木慎介，粘土鉱物の特異な複合体形成挙動 ～色素とセシウムイオンを中心として～，第33回無機高分子シンポジウム（依頼講演）
- ④ 矢挽喬資、江場宏美、桜井健次、「粘土鉱物によるセシウム吸着挙動とその機構」、日本化学会第95春季年会、日大船橋
- ⑤ 伊藤健一・伊原昌史・松田達郎・鈴木正哉・八田珠郎・山田裕久：放射性セシウム汚染土壌の分級分析による減容化と農業用堰の受動的処理効果の検討，第58回粘土科学討論会，福島県福島市
- ⑥ 佐藤努(2014)パッシブ除染、第58回粘土科学討論会，福島県福島市
- ⑦ 齋藤彬人，佐久間博，小田治恵，本田明，佐藤努 “アンモニウム型モンモリロナイトの層間イオンの挙動と膨潤挙動” 第58回粘土科学討論会，福島
- ⑧ 伊藤健一 放射性 Cs の土壌粒度別分布傾向と分級による減容化への取り組み，第58回粘土科学討論会シンポジウム，福島県福島市
- ⑨ 南條正巳，武田 晃，日尾彰宏，伊東久美子，菅野均志，高橋 正 “津波被災水田における放射性セシウムの垂直分布測定事例，第58回粘土科学討論会シンポジウム，福島県福島市
- ⑩ Vallerie Samson、江場宏美、桜井健次、山田裕久、「セシウム吸着粘土鉱物の X線分析のデータ解釈における留意点」第58回粘土科学討論会シンポジウム，福島県福島市
- ⑪ 江場宏美、矢挽喬資、前田剛、V. Samson、桜井健次、山田裕久、「粘土鉱物によるセシウム吸着挙動の X線分析」、セラミックス協会第27回秋季シンポジウム、鹿児島
- ⑫ 加納栞，渡辺雄二郎，山田裕久，小松優 ” 天然クリノプチロライト／アパタイト複合体の作製とそのCsおよびSr吸着能の評価” 第129回無機マテリアル学会 2014年 11月.
- ⑬ 北中康揮，山田裕久，大嶋俊一，藤永薫，小松優，渡辺雄二郎 ” アルカリ水熱合成法による石炭飛灰のゼオライト転換を利用したセシウムイオンの安定化”  
2014年度日本セラミックス協会北陸支部秋季研究発表会 2014年 11月.
- ⑭ 山田裕紀，北中康揮，山田裕久，小松優，藤永薫，渡辺雄二郎 “アルカリ水熱処理を用いた天然ゼオライトの相変化によるCs<sup>+</sup>の安定化” 日本化学会秋季事業 第4回CSJ化学フェスタ 2014年 10月.

## 8.2 学会発表（国際会議）

- ① H. Yamada, Y. Watanabe, S. Yokoyama, M. Suzuki, S. Suzuki, T. Hatta, "Cesium adsorption behavior depending on the degree of vermiculitization of biotite from Fukushima Prefecture, 6<sup>th</sup> International Conference of Ion Exchange (ICIE2014), Okinawa Conventiion Center, Naha, November, 2014.
- ② M. Suzuki, K. Manpuku, A. Hoshinoya, E. Hirabayashi, T. Sato, A. Oowada "The Cesium adsorption-desorption behavior in amorphous aluminium silicates, 6<sup>th</sup> International Conference of Ion Exchange (ICIE2014), Okinawa Conventiion Center, Naha, November, 2014.
- ③ J. Michalik, A. Bagaj. J. Sadlo, G. Strzelczak, H. Yamada "ESR characterization of Cs and Ag sites in clay minerals" , 6<sup>th</sup> International Conference of Ion Exchange (ICIE2014), Okinawa Conventiion Center, Naha, November, 2014.
- ④ T. Sasakura, Y. Watanabe, S. Oshima, K. Fujinaga, H. Yamada, Y. Komatsu "Elution behavior of cesium ion in synthetic mordenite after heat treatment" , 6<sup>th</sup> International Conference of Ion Exchange (ICIE2014), Okinawa Conventiion Center, Naha, November, 2014.

## 8.3 講演会（学協会以外）

- ① Vallerie Ann Innis-Samson, Kenji Sakurai and Hirohisa Yamada, "X-ray structural analysis of modified-Vermiculite and its Cesium absorption capacity" , 共用・計測合同シンポジウム2014、物質・材料研究機構

## 8.4 論文

- ① Fukushima M., Okabe R., Nishimoto R., Fukuchi S., Sato T. and Terashima, M. (2014) Adsorption of pentachlorophenol to a humin-like substance-bentonite complex prepared by polycondensation reactions of humic precursors: *Applied Clay Science*, **87**, 136-141.
- ② Matsunaga, T., Nakanishi, T., Atarashi-Andoh, M., Takeuchi, E., Tsuduki, K., Nishimura, S., Koarashi, J., Ootosaka, S., Sato, T. and Nagao, S. (2015) A passive collection system for whole size fractions in river suspended solids: *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **303**, 1291-1295.
- ③ T. Okumura, K. Tamura, E. Fujii, H. Yamada, and T. Kogure (2014), Direct observation of cesium at the interlayer region in phlogopite mica, *Microscopy*, 63, 65-72, DOI: 10.1093/jmicro/dft045.

- ④ Yamamoto, Takahiro; Fujimura, Takuya; Shimada, Tetsuya; Takagi, Shinsuke (2014) Preparation of the modified mica for the effective adsorbent to remove Cs<sup>+</sup> from water, Chem. Lett. 2014, 43, 860–861. doi:10.1246/cl.140089
- ⑤ Nanzyo, M., H. Kanno, and A. Takeda, (2014) Vertical distribution of radiocesium in side bar deposits of the Utsushi and Agano rivers, Japan, Clay Science, 18[2], 43-52.
- ⑥ Hirohisa YAMADA, Shingo YOKOYAMA, Yujiro WATANABE, Masaya SUZUKI, Shinichi SUZUKI, Tamao HATTA (2014) Cesium-adsorption Behavior of Weathered Biotite from Fukushima Prefecture Depends on the Degree of Vermiculitization, Journal of Ion Exchange, 25, No. 4, pp.207–211.
- ⑦ H. Mukai, T. Hatta, H. Kitazawa, H. Yamada, T. Yaita and T. Kogure (2014) Speciation of radioactive soil particles in the Fukushima contaminated area by IP autoradiography and microanalyses, Environ. Sci. Technol., in press

#### 8.5 解説 なし

#### 8.6 本

- ① 山田裕久, 横山信吾, 渡辺雄二郎, 中田弘太郎, 田村堅志, 佐藤努, 伊藤健一, 八田珠郎 (2014) 「天然鉱物のセシウム吸着能力の比較」放射性物質の吸着・除染および耐放射線技術における材料・施工・測定の新技術, 技術情報協会 (印刷中) (分担執筆)
- ② 山田裕久, 横山信吾, 伊藤健一, 佐藤努, 万福裕造, 八田 珠郎 (2014) 「ジオマテリアルを用いた放射性物質除去・回収・減容技術」 放射性物質除去技術集成, エヌ・ティー・エス (株) (印刷中) (分担執筆)
- ③ 山田裕久, 伊藤健一, 横山信吾: (2014) 「Cs 吸着ハンドブック」, 独立行政法人日本学術振興会産学協力委員会鉱物新活用第 111 委員会土壌中の鉱物における Cs 吸着に関するワーキンググループ編, 星雲社, 東京, PP155, 135–152, 2014. 2. (分担執筆)

#### 8.7 ニュース・新聞

- ① ” 福島放射能汚染における土壌中の放射性微粒子の特定と微粒子中の放射能分布の解明”、2014/11/10 東京大学プレスリリース  
<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2014/50.html>
- ② 2014 年 11 月 12 日 ” 福島土壌中のセシウム、付着しやすい鉱物特定 東大ど” 朝日新聞
- ③ 2014 年 11 月 10 日 ” 土壌のセシウム、黒雲母に吸着 東大など解明” 日本

#### 経済新聞

- ④ 2014年11月10日 ” 園芸用の改良土がセシウム吸着 福島で、東大調査” 共同通信
- ⑤ 2014年11月12日 ” 放射性セシウムは福島で黒雲母が固定” 科学技術振興機構 サイエンスポータル
- ⑥ 2015年2月15日 “放射性ストロンチウムをつかまえる” NHK サイエンス ZERO

#### 8.8 特許

- ① 特願 2013-56199 :放射性イオンの抽出方法、及び放射性イオン抽出システム

## 9 活動（運営委員会等の活動等）

プロジェクトの効果的推進に際して、独立行政法人日本原子力研究開発機構との共同事前打ち合わせ、および福島県飯館村での実施研究を開催した。

成果報告に関しては、日本粘土学会主催の粘土科学討論会（シンポジウム）、**日本粘土学会 公開市民講座**、東北大学金属材料研究所セミナーを開催した。さらに一般向けの講演会（鹿児島大学、長崎大学、九州大学、および北海道大学にて開催）に参画した。

### 9.1 独立行政法人日本原子力研究開発機構（JAEA）- 独立行政法人物質・材料研究機構（NIMS）共同研究ミーティング

日時：平成 27 年 1 月 13 日 9:00～17:30

会場：電力中央研究所 大手町ビル 7 階 第 1 会議室

参加機関：独立行政法人日本原子力研究開発機構、独立行政法人物質・材料研究機構、国立大学法人北海道大学、国立大学法人東京大学、公立大学法人首都大学東京、国立大学法人金沢大学、学校法人金沢工業大学、国立大学法人岡山大学、国立大学法人宮崎大学、独立行政法人国際農林水産業研究センター、独立行政法人産業技術総合研究所、財団法人電力中央研究所

独立行政法人日本原子力研究開発機構からの発表を除く本委託研究プロジェクト関係者の発表は以下である。

- ① 減容化の全体概要と研究の位置づけ 佐藤努（北海道大学）
- ② 分級処理高度化と研究開発課題 伊藤健一（宮崎大学）
- ③ 溜め池関連研究報告と研究開発課題 鈴木正哉（AIST）
- ④ 今後の計画に関する総合討論 山田（NIMS）/矢板（JAEA）

#### ・戦略会議

日時：平成 27 年 2 月 6 日 13:30-16:30

会場：北海道大学 工学部 A 棟 101 会議室

参加機関：独立行政法人日本原子力研究開発機構、独立行政法人物質・材料研究機構、国立大学法人北海道大学、国立大学法人宮崎大学、独立行政法人国際農林水産業研究センター、独立行政法人産業技術総合研究所、財団法人電力中央研究所

検討内容の概要：

実機の減容化・企業における減容化の現状・Cs 吸脱着モデルに基づく減容化手法の検討・成果発信等についてのコアミーティングを開催した。

### 9.2 日本粘土学会主催 第 58 回 粘土科学討論会（シンポジウム）

日時：平成 25 年 9 月 24 日 午前 13:20-17:20

会場：福島市 A・O・Z（アオウゼ）（MAX ふくしま 4 階）

テーマ：「放射能汚染と今後に向けて」

13:20 - 13:40 除染研究に対する粘土からの取り組み - 背景と課題 -

- 物質・材料研究機構 山田裕久
- 13:40 - 14:00 農業再生に関するこれまでの取り組み  
福島県農業総合センター 吉岡邦雄
- 14:00 - 14:20 被災住民の理解への取り組み  
国際農林水産業研究センター 万福裕造
- 14:20 - 14:40 放射性 Cs を吸着している粘土鉱物は何か  
－電子顕微鏡による探索－  
東京大学 小暮敏博・向井広樹・甕聡子
- 15:20 - 15:40 粘土鉱物へのセシウム吸脱着機構解明  
－福島原発事故を通じて新しく分かったことと今後の課題－  
日本原子力研究開発機構 矢板毅他
- 15:40 - 16:00 各種粘土鉱物の Cs の収着・脱離挙動  
電力中央研究所 横山信吾他
- 16:00 - 16:20 放射性 Cs の土壌粒度別分布傾向と  
分級による減容化への取り組み  
宮崎大学 伊藤健一
- 16:20 - 16:40 熔融技術による土壌等からの Cs 分離  
前株式会社クボタ 阿部清一

### 9.3 日本粘土学会 公開市民講座

日時：9月26日(金) 18:00～19:30

会場：福島市 A・O・Z (アオウゼ) 多目的ホール

テーマ：「粘土とセシウム」

司 会：万福裕造 (国際農研)・横山信吾 (電中研)

- |          |                   |
|----------|-------------------|
| 1)開会挨拶   | ○菅野典雄 (飯舘村村長)     |
| 2)取組みの現状 | ○福島伸一郎 (復興庁福島復興局) |
| 3)粘土への吸着 | ○横山信吾 (電中研)       |
| 4)ため池    | ○鈴木正哉 (産総研)       |
| 5)パッシブ除染 | ○佐藤 努 (北大院工)      |
| 6)焼却     | ○八田珠郎 (国際農研)      |
| 7)今後に向けて | ○山田裕久 (物材機構)      |
| 8)閉会挨拶   | ○古川道郎 (川俣町町長)     |

### 9.4 東北大学金属研究所共同利用ランダム構造セミナー

日時：平成 27 年 1 月 22-23 日

会場：東北大学 金属研究所 (国際教育研究棟セミナー室)

本プロジェクト関係者の講演は以下である。

- ① 「Cs 除染プロジェクトの概要」 山田裕久 (物質・材料研究機構)
- ② 「溜め池の底土における Cs 濃度分布と存在状態について」  
鈴木正哉 (産業技術総合研究所)
- ③ 「粘土鉱物 (バーミキュライト) における Cs 吸着挙動について」

森本和也（産業技術総合研究所）

④ 「粘土鉱物における Cs 吸着機構についての計算科学からのアプローチ」

末原 茂（物質・材料研究機構）

9.5 一般向けの講演会(4回)：委託研究参画者を中心として記載する

日時：平成 26 年 10 月 3 日

会場：鹿児島大学 農・獣医共通棟 101 号教室

プログラム：

- ① 産官学連合による研究の紹介（NIMS 山田裕久）
- ② 研究サイトからの支援及び農業用ため池を利用したセシウム回収（産業技術総合研究所 鈴木正哉）

日時：平成 24 年 11 月 24 日

会場：長崎大学 医学部ポンペ会館会議室

プログラム：

- ① セシウムの粘土への吸着（産総研 森本和也）
- ② セシウムのホットスポットとしての調整池（産総研 鈴木正哉）
- ③ 産官学連合による研究の紹介（物質・材料研究機構 山田裕久）

日時：平成 25 年 12 月 11 日

会場：九州大学 箱崎キャンパス図書館 4 F 視聴覚ホール

プログラム：

- ① セシウムの粘土への吸着（産総研 森本和也）
- ② セシウムのホットスポットとしての調整池（産総研 鈴木正哉）
- ③ 産官学連合による研究の紹介（物質・材料研究機構 山田裕久）

日時：平成 27 年 2 月 6 日

会場：北海道大学 工学部 A 棟 101 会議室

シンポジウム 「福島除染と除染廃棄物の未来」

プログラム：

- ① 開会の挨拶（北大 佐藤 努）
- ② JAEA-NIMS によるセシウムプロジェクトの概要（JAEA 矢板 毅）
- ③ 除染廃棄物の減容化のための分離・分級（宮崎大 伊藤健一）
- ④ 分けるってわけないー選鉱技術の基礎（北大・伊藤真由美）
- ⑤ 質疑応答
- ⑥ 福島の現状と除染・減容化技術（国際農林水産業研究センター 万福裕造）

## ⑦ 除染の費用と効果（産総研 保高徹生）

### 9.6 福島県飯舘村での実施研究（3回）

日時：平成26年7月20-25日、10月6-10日、12月1-5日

会場：福島県相馬郡旧飯舘村役場および飯舘村内

参加機関：独立行政法人物質・材料研究機構、国立大学法人北海道大学、国立大学法人宮崎大学、独立行政法人国際農林水産業研究センター、独立行政法人産業技術総合研究所、財団法人電力中央研究所、独立行政法人日本原子力研究開発機構

実施研究補助（国土防災技術株式会社、株式会社アステック東京、石原産業株式会社、ユーロシステム株式会社、クニミネ工業株式会社）

環境中での動態（地球表層での元素移動・元素分配など）およびこれに基づく減容化基盤技術・包括的処理・保管に関する技術レファレンスの確立を最終目標として、福島県飯舘村周辺での実施研究を3回行った。天然鉍物を主な対象とした分級法をはじめとした方法などについて早期開発のために、吸着粘土鉍物・材料の特性把握（安定性の長期将来予測、溶液化学的安定性など）、汚染農地土壌および森林土壌中の鉍物の特徴解明、汚染溜め池底土の特徴の検討、環境中での動態の検討、仮置き場・中間貯蔵施設の安全性を想定しての検討、飯舘村・浪江町の現場における実証検討、ホット・コールドの比較検討を推進した。



## 情報参考報告書等 一覧

独立行政法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門	平成25年度除染技術実証事業（環境省受託事業）報告書	<a href="http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/entry07_25.html">http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/entry07_25.html</a>
独立行政法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門	平成24年度除染技術実証事業（環境省受託事業）報告書	<a href="http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/entry07_24.html">http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/entry07_24.html</a>
独立行政法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門	平成23年度除染技術実証事業（環境省受託事業）報告書	<a href="http://fukushima.jaea.go.jp/information/20121026.html">http://fukushima.jaea.go.jp/information/20121026.html</a>
独立行政法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門	福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務（平成23年度内閣府受託事業）	<a href="http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf/report_3.pdf?140122">http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf/report_3.pdf?140122</a>
日本原子力学会	福島第一原子力発電所事故に係るサイト外緊急時対応の調査及び環境修復活動の検討に関する報告	<a href="http://www.aesi.or.jp/CU/">http://www.aesi.or.jp/CU/</a>
環境省 減容化処理に係わるアドバイザー委員会		<a href="http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_fukushima/waste_disposal/advisory.html">http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_fukushima/waste_disposal/advisory.html</a>

放射性物質汚染土壌の減容化に関する情報収集・整理業務委託(文献一覧)

通番	検索先	検索key	文献名	Title	著者	発行者・学会	発行時期	巻・号・頁
1	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	あ 亜臨界水熱爆砕法による放射性廃棄物処理	Radioactive waste treatment by subcritical hydrothermal blasting	中村聡, 神保安広 (CDMコンサルティング), 石堂昭夫 (原子カバックエンド推進セ)	デコミッションング技報	2013/06/10	特別号, Page.2-7
2	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	あ 亜臨界水熱爆砕法による放射性セシウム除去・減容化技術の開発		中村聡, 神保安広 (CDMコンサルティング)	東京都立産業技術研究センター研究成果発表会要旨集	2013/06/20	Vol.2013, No.June, Page.82
3	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	い 一般焼却飛灰からのセシウム溶出特性に関する研究		澤田貴矢, 渡邊優香, 宋麗華, 島岡隆行	廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集	2013/07/08	Vol.23, 2012
4			い 飯館村蕨平地区における可燃性廃棄物減容化事業について (概要)		環境省	福島県飯館村HP	2013/10/09	ppt
5	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	い 飯館村における空気揚土攪拌式洗浄装置を用いたセシウム汚染土壌の減容化の実証試験		惣田訓, 池道彦, 西嶋茂宏 (大阪大大学院工学研究科), 森本成樹, 東利保 (サンエイ)	環境工学研究フォーラム講演集	2013/11/19	Vol.50th,Page.1-3
6	J-STAGE	セシウム, 吸着	い 茨城県南部土壌のセシウム吸着特性	Cesium Adsorption Properties of Soils in Southern Ibaraki, Japan	田村昭典, 西脇淳子, 軽部重太郎	農業農村工学会論文集	2013/12/01	Vol.81, No.6, p.595-600
7			い 飯館村蕨平地区における可燃性廃棄物減容化事業についてー福島県全体の復興のためにー		菅野典雄 (飯館村長)	福島・国際研究産業都市構想研究会 (第6回)	2014/06/09	ppt
8	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	え X線分光法と計算科学による土壌中セシウムの評価	Evaluation of cesium in soil using X-ray spectroscopy and theoretical calculations	鈴木知史, 矢板毅, 加治芳行 (日本原子力研究開発機構)	日本原子力学会春の年会予稿集 (CD-ROM)	2013/03/26	Vol.2013,Page.ROMBUN NO.A36
9	国会図書	ー	お 汚染土壌からのセシウム溶離回収技術の開発 (1) 全体計画	Development of Removal technology from contaminated soil (1)General Plan	三倉通孝, 山本誠二, 市川長佳, 芝野隆之	日本原子力学会春の年会予稿集 (CD-ROM)	2012/03/26	Vol.2012page542
10	国会図書	ー	お 汚染土壌からのセシウム溶離回収技術の開発 (2) 溶離試験	Development of Removal technology from contaminated soil (2)Experiments of elution of Cs ion	井上由樹, 中村秀樹, 三倉通孝, 福島正	日本原子力学会春の年会予稿集 (CD-ROM)	2012/03/26	Vol.2012page543
11	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	お 汚染土壌対策 放射性Cs汚染土の浄化・減容化技術の開発ー土壌分級・洗浄技術の適用ー		土田充, 毛利光男 (清水建設)	土木施工	2012/07/21	Vol.53, No.8, Page.61-62
12	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	お 汚染された農地土壌からセシウムを99%除去ー汚染土壌などの大幅な減容化に期待ー		万福裕造 (国際農林水産業研究セ), 木村武 (農業・食品産業技術総合研究機構), 三浦啓一, 本間健一 (太平洋セメント中研), 佐々木忠志 (日揮技術開発本部), 真保崇 (東京電力)	JATAFFジャーナル	2013/04/01	Vol.1, No.4, Page.44-51
13			お オゾンを用いた排ガス処理装置付輻射熱分解炉による有機物等減容化技術ー岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業 (平成25年度) 実証試験結果報告ー		三井住友建設株式会社東北支店 (宮城県), 小原建設株式会社 (岩手県)	岩手県	2014/03/31	
14	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	お 汚染土壌の貯蔵負荷低減のためのセシウム溶出回収処理 (3) セシウム溶出回収処理後の線量低減化の計算	Elution and cesium for reduction of storage of the contaminated soil (3) Trial-calculation of reduction of external exposure dose	吉田茂生, ALOWASHEEIR A., 浅沼徳子 (東海大工)	日本原子力学会秋の大会予稿集 (CD-ROM)	2014/08/22	Vol.2014, Page.226
15	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	お 汚染土壌からの放射性セシウムの除去・回収	Removal and recovery of radioactive cesium from contaminated soil	高橋勇介, 藤井隆夫, 島長義, 石井和之, 工藤一秋, 立間徹, 藤田洋崇, 佐藤理夫, 迫田章義	生産研究	2014/09/27	Vol.66(2014)No.4
16	CiNii	減容化	お 汚染水浄化, 汚染土壌減容化のキーテクノロジーは固液分離技術 (小特集 粒子・流体プロセス部会の最新動向と活動報告 : 震災復興への粒子・流体プロセス工学的アプローチ)	Solid/Liquid Separation is the Key Technology for Purifying the Radio-Contaminated Water and Reducing Volume of the Radio-Contaminated Soil	椿淳一郎	化学工学	2014/11/01	Vol.78(No.11), page815-817
17			か 画期的なセシウム吸着剤を開発			(独)物質・材料研究機構	2013/01/11	HP
18	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	か 界面化学的分散制御高せん断解砕による放射能汚染土壌洗浄 福島県における汚染土壌洗浄処理フィールド試験 (第1報)	New Combination Washing Approach of Chemical Interface Controlled Dispersion and High-Speed Shearing Washing Techniques for Radioactive Contaminated Soil (First Report of Field Test in Fukushima)	石山新太郎, 神谷昌岳, 近藤充記	日本機械学会論文集B編	2013/06/25	Vol.79(2013)No.802, Page1106-1121
19	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	か 環境汚染と除染 住民への理解と廃棄物の減容化が課題		井上正 (電力中研)	エネルギーレビュー	2013/07/20	Vol.33, No.8, Page.19-20
20	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	か カチオン種の異なる各種ゼオライトによるセシウムイオンの回収と固定化		渡辺雄二郎, 鈴木憲子, 山田裕久, 藤永薫, 小松優	日本イオン交換学会誌	2013/09/20	Vol.24(2013)No.3
21	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	か 乾式Cs除去技術で生成する浄化処理物の各種土工資材評価		本間健一, 田中宜久, 岡村聡一郎, 石田泰之, 高野博幸, 山本博英, 宮内千里, 後藤菊次	廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集	2013/11/02	Vol.24(2013)
22			か 家畜ふん堆肥に含まれる放射線セシウムについて		荒川市郎	日本作物学会 東北支部報	2013/12/20	No.56(2013)
23	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	か 革新的環境浄化技術の開発 ナノカルシウム鉄による放射性セシウム汚染土壌の乾式除染技術		三苦好治 (県立広島大大学院総合学術研究科), 奥田哲士 (広島大環境安全セ)	ケミカルエンジニアリング	2014/04/01	Vol.59, No.4, Page.274-280

通番	検索先	検索key	文献名	Title	著者	発行者・学会	発行時期	巻・号・頁
24	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	き 期待高まる除染技術実証事業 環境省「除染技術実証事業」の概要		大能直哉(環境省)	月刊ビジネスアイエネコ	2013/01/01	Vol.46, No.1, Page.86-87
25			き 基礎物性・挙動解析プロジェクト報告		倉持秀敏, 由井和子, 肴倉宏史, 石森洋行, 遠藤和人, 保高徹生: (国立環境研究所)	国立環境研究所 環境回復研究プログラム(PG1)の成果 [HP]	2013/07/01	HP (ppt)
26	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	く 草木類を含む土壌の溶融処理試験		阿部清一, 川本克也, 水原詩治, 福島正明	廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集	2013/11/02	Vol.24(2013)
27			く 空気揚土攪拌式洗浄装置を用いた放射性セシウム汚染土壌の減容化方法の開発		西嶋茂宏 (大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻教授)	環境省環境研究総合推進費終了成果報告集	2014/10/09	5ZB-1204
28	J-STAGE	-	げ 現地土壌におけるセシウム固定 復興農学が目指すもの—東日本大震災からの復興への貢献と課題—	Radiocesium Fixation in Soils and Its Determinant Factors in Fukushima	中尾淳 (京都府立大学大学院生命環境科学研究科)	学術の動向	2014/07/01	Vol.19, No.7, p.7_40-7_42
29	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	こ 高温加熱処理による高濃縮汚染残土の高減容化に関する研究 福島県における汚染土壌洗浄処理フィールド試験 (第4報)	Volume reduction effect of radioactive contaminated soil by high temperature heating process	石山新太郎, 神谷昌岳, 近藤充記, 比氣明典	日本機械学会論文集 A 編	2013/10/25	Vol.79(2013)No.806, page1504-1516
30	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	こ 高放射能汚染土壌の界面化学的分散制御高速せん断流解砕洗浄による再生土化		石山新太郎, 神谷昌岳, 近藤充記, 比氣明典	化学工学論文集	2013/11/20	Vol.39(2013)No.6, Page545-552
31	環境放射	-	こ 湖沼底泥の湿式触媒酸化法による減容化と除染効果	Volume Reduction of Lake Sediment and Decrease of its Cesium Content in Decontamination Process by Wet Oxidation Method	原田茂樹, 庄子政巳, 伊藤憲, 千葉信男, 須藤隆一, 北辻政文	環境放射能除染学会誌	2014/03/01	Vol.2, No.1(2014)
32	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	こ 耕起した放射能汚染水田を除染するための濁水回収システムを組み込んだ水による土壌攪拌工法の開発		今泉真之, 奥島修二, 塩野隆弘, 石田聡, 吉本周平, 鎌田雅美, 千田善秋, 友口勝, 中達雄	農業農村工学会論文集	2014/08/25	Vol.81(2013)No.4
33	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	こ 高放射能汚染土壌洗浄システムにおける水循環システムの性能評価		石山新太郎	化学工学論文集	2014/11/20	Vol.40(2014)No.6
34	J-STAGE	減容, 放射性	さ 産業用ゴミ焼却炉を用いた放射性セシウム汚染土壌の減容除染システムの検討	Volume-reduction and Decontamination System Consideration of Radioactive Cesium Contaminated Soil using Industrial Waste Incinerators	峰原英介, 高田卓志, 遠藤伸之, 毛利幸生, 小林良久	日本原子力学会	2013/03/26	2013年春の年会, セッションID: A43
35	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	さ 最新の土壌・地下水汚染浄化技術 放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化システムの開発 効率的な浄化・減容化と作業員の被曝線量の大幅な低減を可能とした新しい洗浄技術の実用化		毛利光男(清水建設)	環境浄化技術	2013/09/01	Vol.12, No.5, Page.5-12
36	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ざ 雑草繁茂域における植物体および表層土の効率的な除染および減容化方法		高畑陽, 根岸昌範, 屋杵下亮, 斎藤祐二(大成建設技術セ)	地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集(CD-ROM)	2013/06/13	Vol.19th, Page.273-276
37	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	し 湿式分級洗浄および天然鉱物等による農地土壌等に含まれる放射性セシウム除去方法の実践的検討	Practical Approach to Decontamination of Radioactive Cesium-Contaminated Matter in Agricultural Region by Improved Wet Classification Use of Geomaterials	伊藤健一, 宮原英隆, 氏家亨, 武島俊達, 横山信吾, 中田弘太郎, 永野哲志, 佐藤努, 八田珠郎, 山田裕久	日本原子力学会和文論文誌	2012/10/25	Vol.11(2012)No.4, page255-271
38	J-STAGE	放射性, 減容	し 焼却施設における廃棄物減容化と放射性セシウムの挙動	Waste reduction properties in incineration plant and fate assessment of radioactive cesium	川本克也, 福島正明, 田野崎隆雄, 竹内幸生	廃棄物資源循環学会研究発表会 (第24回)	2013/11/02	セッションID: C4-2
39	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	じ 除染へ挑戦する建設土木技術		松本聰	学術の動向	2012/10/01	Vol.17, No.10
40	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	じ 地盤環境中の放射性物質の挙動 <特集>汚染土壌・廃棄物等の処理	Distribution and Behavior of Radioactive Contamination in Geo-environment(<Theme>Treatment of Contaminated	保高徹生(産業技術総合研), 伊藤健一(宮崎大), 鈴木弘明(日本工営), 中島誠(国際環境ソリューション), 山田優子(応用地質)	地盤工学会誌	2013/02/01	Vol.61(2), 24-27
41	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	じ 除染作業により除去された土壌等の除去物の仮置場の設計・建設および維持・管理	Design, Construction and Monitoring of Temporary Storage Facilities for Removed Contaminants	三枝博光, 舟木泰智, 操上広志, 坂本義昭, 時澤孝之	日本原子力学会和文論文誌	2013/02/15	Vol.12(2013)No.1
42	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	じ ジオマテリアルを利用した除染	Decontamination by Use of Geomaterials	山田裕久, 越後拓也, 宮原英隆, 田村堅志(物質・材料研究機構環境再生材料ユニット), 渡辺雄二郎(金沢工業大学バイオ・化学部応用化学科)	表面科学	2013/03/22	Vol.34, No.3, Page.143-148
43	環境放射	-	じ 磁化Na-P1 型ゼオライトによる土壌Csの除去技術の開発	Development of Decontamination Technique for Radioactive Cs in Soil Using Composite Material of Na-P1 Type Zeolite and Magnetite	逸見彰男, 青野宏通, 田村一将, 松枝直人, エルニョジョン, 山内理恵, 山本徹, 福垣内暁, 山内理恵, 山本徹, 福垣内暁	環境放射能除染学会誌	2013/06/01	Vol.1, No.1(2013)
44	土木学会	放射性	じ 除染除去土壌に対する分級時の洗浄技術の適用性検討		岡島伸行, 吉原到, 仙頭紀明	土木学会年次学術講演会講演概要集	2013/09/04	Vol.68(2013)
45	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	じ 除染可燃物焼却灰(飛灰・主灰)の減容固化技術の開発		弘末文紀, 斉藤栄一, 中島貴弘, 坂本守, 島岡隆行	廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集	2013/11/02	Vol.24, 2013

通番	検索先	検索key	文献名	Title	著者	発行者・学会	発行時期	巻・号・頁
46			じ 除染廃棄物の減容(2.6) 福島第一原子力発電所事故に係るサイト外緊急時対応の調査及び環境修復活動の検討に関する報告		福島特別プロジェクト クリーンアップ分科会	日本原子力学会	2013/12/02	報告書
47			じ 磁気分離による汚染土壌の減容化の試み		西嶋茂宏	Isotope News	2014/03/01	No. 719
48	日本原子	洗浄	じ 除染技術選定・評価等業務報告書(平成24年度)ー環境省平成24年度除染技術実証事業(受託研究)ー	Report for "FY 2012 Evaluation of Decontamination Technology Demonstrations Projects for the environmental remediation with radioactive materials discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident" (Contract research)	渡辺将久, 梅宮典子, 田川明広, 川瀬啓一, 野口真一, 坂爪克則, 渡邊雅範, 時澤孝之	JAEA-Review	2014/03/01	2013-052
49	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	じ 除染技術ー物理分離・分級と土壌添加による低温加熱の有効性 粉体技術のイノベーション		張其武, 桐島陽, 佐藤修彰(東北大多元物質科研), 齋藤文良	化学装置	2014/05/01	Vol.56, No.5, Page.16-21
50	環境放射	ー	じ 事故由来放射性物質汚染廃棄物の熱処理に関するこれまでの研究成果	Thermal Treatment of Waste Contaminated with Radioactive Chemicals due to the Accident at Fukushima Nuclear Power Stations: A Review of Recent Research Findings and Introduction of Some	倉持秀敏	環境放射能除染学会誌	2014/06/01	Vol.2, No.2(2014)page71-84
51	地盤工学	減容化	じ 除染除去土壌に対する超音波洗浄装置の適用性検討		榊原雅人, 仙頭紀明	地盤工学研究発表会発表講演集	2014/07/01	第49回, page2049-2050
52	J-STAGE	ー	じ 除染技術の高度化ーセシウムの濃縮分離(放射性物質で汚染された土壌からの熱処理によるセシウム除去) 復興農学が目指すものー東日本大震災からの復興への貢献と課題ー	Scientific Progress of Decontamination Technology -Separation and Concentration of Cesium (Removal of Cesium from the soil contaminated with radioactive materials by heat treatment)	万福裕造 ((独)国際農林水産業研究センター)	学術の動向	2014/07/01	Vol.19, No.7, p.7_44-7_47
53	J-STAGE	減容	じ 除染廃土の湿式減容技術 復興農学が目指すものー東日本大震災からの復興への貢献と課題ー	Wet Volume Reduction Technology of Radioactively Contaminated Soil	椿淳一郎 (こな椿ラボ, 名古屋大学)	学術の動向	2014/07/01	Vol.19, No.7, p.7_48-7_49
54	日本原子	洗浄	じ 除染技術選定・評価等業務報告書(平成25年度)ー環境省平成25年度除染技術実証事業(受託研究)ー	Report for "FY 2013 Evaluation of Decontamination Technology Demonstrations Projects for the environmental remediation with radioactive materials discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident" (Contract research)	渡辺将久, 田川明広, 梅宮典子, 丸山登, 吉田真美, 川瀬啓一, 野口真一, 坂爪克則, 渡邊雅範, 平賀隼人 他	JAEA-Review	2014/10/01	2014-028
55	国会図書	放射性物質	す スクラビング・フローテーションを用いた土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の効率的な浄化と減容化		毛利光男	建設の施工企画	2012/12/01	No.754
56	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	す 水稲栽培試験田における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (2) 水稲栽培試験田におけるセシウムの挙動評価	A test case of clean-up of a radioactively-contaminated paddy field,(2)Evaluation of cesium behavior on paddy cultivation test.	三倉通孝, 山下祐司, 鴨志田守, 菊池孝浩	日本原子力学会 年会・大会予稿集	2013/03/26	Vol.2013f(2013)
57	CiNi	放射性セシウム	す 水稲栽培試験田における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究: (1) 試験計画および現地概要	A test case of clean-up of a radioactively-contaminated paddy field:Outline of paddy cultivation test at the experiment field	佐藤修彰, 梅田幹, 雨宮清, 三島毅, 藤井靖彦	日本原子力学会春の年会予稿集(CD-ROM)	2013/03/26	Vol.2013,Page.41
58	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	す 水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (1) 全体計画と現地の概要		三倉通孝, 菊池孝浩, 長岡亨	日本原子力学会 年会・大会予稿集	2013/07/03	Vol.2012f(2012)
59	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	す 水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (2) 放射線測定と汚染状況の評価		三倉通孝, 菊池孝浩, 長岡亨	日本原子力学会 年会・大会予稿集	2013/07/03	Vol.2012f(2012)
60	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	す 水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (3) 荒搔き作業と除染効果の評価		三倉通孝, 菊池孝浩, 長岡亨	日本原子力学会 年会・大会予稿集	2013/07/03	Vol.2012f(2012)
61			せ 洗浄・水処理プロジェクト報告		蛭江美孝, 大迫浩造: (国立環境研究所)	国立環境研究所 環境回復研究プログラム(PG1)の成果 [HP]	2013/07/01	HP (ppt)
62	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ち 超電導磁石を用いたセシウム汚染土壌の除染に向けた土壌の磁気分離に関する研究	Study on soil magnetic separation using superconducting magnet for decontamination of cesium contaminated soil	五十嵐亨, 野村直希, 三島史人, 秋山庸子, 西嶋茂宏(大阪大)	低温工学・超電導学会講演概要集	2013/12/04	Vol.88th,Page.107
63	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ち 超電導磁石を用いた高勾配磁気分離によるCs汚染土壌の減容化	Volume Reduction of Cesium Contaminated Soil by HGMS using Superconducting Magnet	五十嵐亨, 野村直希, 三島史人, 秋山庸子, 西嶋茂宏(大阪大)	電気学会超電導機器研究会資料	2014/01/30	Vol.ASC-14, No.1-7.9-14, Page.51-55
64	土木学会	放射性セシウム	つ 土の粒度分布に注目した放射性物質吸着土壌の減容化に関する検討		吉井大貴, 飯塚敦, 河井克之, 西門優	土木学会年次学術講演会講演概要集	2014/09/10	Vol.69(2014)
65	CiNi	セシウム, 吸着	て 天然鉱物によるセシウムの吸着に関するデータベースの一例	Example of Cesium Sorption Database in Natural Minerals	横山信吾, 山田裕久, 渡辺雄二郎, 中田弘太郎, 田村堅志, 佐藤努, 伊藤健一, 八田珠郎	粘土科学	2013/08/19	VOL.52, No.1, Pp.32-39
66	地盤工学	セシウム	で 電気泳動法を利用したカオリン粘土に含有するセシウムの除去に関する実験・解析		佐々木清一, 原伸行	地盤工学研究発表会発表講演集	2014/07/01	第49回, page2013-2014
67			と 特殊ジオテキスタイル製袋を活用した水路底質等の脱水減容化ー岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業(平成24年度)実証試験結果報告ー		株式会社ピーエス三菱(東京都)	岩手県	2014/01/18	
68	日本原子	放射性セシウム	ど 土壌の原位置加熱による放射性セシウムの除去可能性の検討		日本原子力研究開発機構	JAEA-Research	2011/11/01	2011-026
69	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	ど 土壌からのセシウムの分離		三好弘一	日本放射線安全管理学会誌	2012/11/21	Vol.11(2012)No.2

通番	検索先	検索key	文献名	Title	著者	発行者・学会	発行時期	巻・号・頁
70	日本原子	減容化	ど 土壤へのセシウム吸着機構; 第一原理計算による白雲母のほつれたエッジサイトへの放射性セシウム吸着研究	Mechanism of strong affinity of clay minerals to radioactive cesium; First-principles calculation study for adsorption of cesium at frayed edge sites in muscovite	奥村雅彦; 中村博樹; 町田昌彦	Journal of the Physical Society of Japan/日本物理学会	2013/03/01	Vol.82,No.3,page033802_1-033802_5
71	環境放射	ー	ど 土壤からのCs除去を目的とした磁化Na-P1型ゼオライトの合成	Preparation of Composite Materials of Na-P1 Type Zeolite and Magnetite for Cs Decontamination in Soil	青野宏通, 横田彩子, 溝口裕己, 田村一将, 渡部祐輔, エルニョハン, 山内理恵, 松枝直人, 山本徹, 逸見彰男	環境放射能除染学会誌	2013/06/01	Vol.1,No.1(2013)
72	JDream	土壤, 減容化, 放射性セシウム	ど 土壤洗浄を用いた放射性Cs汚染土壤の減容化と濃縮残渣処理の自動化について		毛利光男, 土田充, 馬場直紀, 保坂幸一, 中嶋卓磨(清水建設)	地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集(CD-ROM)	2013/06/13	Vol.19th,Page.493-497
73	CiNii	ー	ど 土壤中の放射性セシウムの安定性に関する研究 (A20)		横山信吾(電力中央研究所), 中田弘太郎(電力中央研究所), 鈴木伸一(日本原子力研究開発機構), 伊藤健一(宮崎大学), 八田珠郎(国際農林水産業研究センター), 山田裕久(物質・材料研究機構)	粘土科学討論会講演要旨集	2013/09/04	vol.57, p.70-71
74	環境放射	ー	ど 土壤洗浄法による放射性物質汚染土壤の浄化・減容化および濃縮残渣処理の自動化	Application of Soil Washing System to the Volume Reduction of Radioactively Contaminated Soils and Automated Treatment of Sludge Cake	毛利光男, 土田充, 馬場直紀, 中嶋卓磨	環境放射能除染学会誌	2013/11/01	Vol.1,No.3(2013)page213-219
75			ど 土壤の浄化・減容技術に関する技術情報		浄化土壤WG	除染・廃棄物技術協議会	2013/12/25	
76	JDream	土壤, 減容化, 放射性セシウム	ど 土壤細粒等からの常温常圧下でのCs容離および容離したCsの吸着・濃縮による減容化技術-放射性物質による環境汚染と対策の現状-		一丸真一, 坂下大地, 佐久間博司(水研), 下村達夫, 関根智一, 三甘崇博(荏原工業洗浄)	環境浄化技術	2014/01/01	Vol.13,No.1,Page.70-73
77	JDream	土壤, 減容化, 放射性セシウム	ど 土壤洗浄による除去土壤の浄化・減容化-放射性物質による環境汚染と対策の現状-		中島卓夫(鴻池組)	環境浄化技術	2014/01/01	Vol.13,No.1,Page.53-57
78	土壤物理	放射性	ど 土壤への放射性Csの吸着メカニズム	Adsorption mechanism of radiocesium on soil	山口紀子((独)農業環境技術研究所)	土壤の物理性	2014/04/01	No.126, p.11-21
79	土壤物理	放射性	ど 土壤中の放射性Csの移動	Migration of radioactive Cs in soil	西村拓(東京大学大学院農学生命科学研究科)	土壤の物理性	2014/04/01	No.126, p.37-43
80			ど 土壤から作物へ, セシウムの移行とその要因		古川純	生物工学会誌	2014/06/01	vol. 92, No. 5, Page. 225-227no. 6, p. 284-286
81			ど 道路維持管理に伴い発生する放射性セシウム含有土砂の分級洗浄処理実験		佐藤靖彦, 石山宏二, 石渡寛之, 安藤淳也	地盤工学研究発表会発表講演集	2014/07/01	第49回, page2019-2020
82	JDream	土壤, 減容化, 放射性セシウム	な ナノカルシウムによる放射性セシウム汚染土壤の除染技術	Decontamination of radioactive cesium in soil using nano-size metallic calcium dispersing	三苫好治(県立広島大生命環境), 福岡猛三, 松江英彰, 小林秀匡(御池鐵工所), 白石祐彰(奥村組技研), 梶谷幹男(原子力バックエンド推進セ)	デコミッションング技報	2013/06/10	特別号,Page.24-29
83	JDream	土壤, 減容化, 放射性セシウム	な ナノバブル水を用いた放射性物質汚染側溝汚泥の洗浄減容化実証試験	Performance verification test on cleaning and volume reduction of contaminated ditch soil using nano-bubble containing water	佐藤敦政(アース), 面政也(東京産業), 河西善充(原子力バックエンド推進セ)	デコミッションング技報	2013/06/10	特別号,Page.30-34
84			ね 熱処理減容化等プロジェクト報告		川本克也(国立環境研究所)	国立環境研究所 環境回復研究プログラム(PG1)の成果[HP]	2013/07/01	HP(ppt)
85	JDream	土壤, 減容化, 放射性セシウム	ね 粘土鉱物からのCs吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(3) TR-DXAFSおよびSTXMIによる粘土鉱物への吸着挙動解析		矢板毅, 鈴木伸一, 松村大樹, 小林徹, 塩飽秀啓, 門馬利行, 中山真一(原子力機構)	日本原子力学会秋の大会予稿集(CD-ROM)	2013/08/20	Vol.2013,Page.ROMBUN NO.042
86	国会図書	ー	ね 粘土鉱物からのCs吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(2) XAFS法による粘土鉱物のCs吸着構造と特異吸着サイトの解明		小林徹, 塩飽秀啓, 鈴木伸一, 矢板毅, 宮崎有史, 門間利行, 中山真一	日本原子力学会秋の大会予稿集(CD-ROM)	2013/09/03	Vol.2013,Page.708
87	国会図書	ー	ね 粘土鉱物からのCs吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(4) 熱処理粘土鉱物におけるセシウム移行挙動の解明	Elucidation of Cs adsorption-desorption mechanism on clay minerals and development of Cs removal for volume reduction of contaminated wastes, 4; Behavior analysis on transfer of cesium adsorbed on clay minerals under several conditions.	岡本芳浩, 大杉武史, 塩飽秀啓, 赤堀光雄	日本原子力学会秋の大会予稿集(CD-ROM)	2013/09/03	Vol.2013,Page.710
88	国会図書	ー	ね 粘土鉱物からのCs吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(5) 第一原理計算が示す粘土鉱物におけるCsの微視的吸着機構	The Elucidation of Cs adsorption-desorption mechanism for clay minerals and development of Cs desorption for volume reduction of contaminated wastes, 5; First principles calculation studies for microscopic mechanism of Cs adsorption in clay.	町田昌彦, 奥村雅彦, 中村博樹	日本原子力学会秋の大会予稿集(CD-ROM)	2013/09/03	Vol.2013,Page.711
89	JDream	土壤, 減容化, 放射性セシウム	ね 粘土鉱物からのCs吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(1) 福島産パーミキュライトによるCs吸脱着挙動	Elucidation of Cs adsorption-desorption mechanism on clay minerals and development of Cs removal for volume reduction of contaminated wastes. (1)Cs adsorption-desorption behavior with vermiculite of Fukushima.	鈴木伸一, 小林徹, 矢板毅, 門馬利行, 中山真一(原子力機構), 山田裕久(物質・材料研究機構), 八田珠郎(国際農林), 横山信吾(電力中研)	日本原子力学会秋の大会予稿集(CD-ROM)	2013/09/03	Vol.2013,Page.ROMBUN NO.040

通番	検索先	検索key	文献名	Title	著者	発行者・学会	発行時期	巻・号・頁
90	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	ね 粘土鉱物-セシウム相互作用研究の最近の動向		横山信吾, 伊藤健一, 八田珠郎, 山田裕久	地盤工学会誌	2013/12/01	Vol.61(No.11/12),page26
91	J-STAGE	セシウム, 吸着	ね 粘土鉱物に吸着したセシウムの水相における移行現象	Transfer Behavior of Cesium Adsorbed on Clay Minerals in Aqueous Solution	岡本芳浩, 大杉武史, 塩飽秀啓, 赤堀光雄	日本原子力学会和文論文誌	2014/03/01	Vol.13, No.3, p.113-118
92	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	の 農地土壌等における放射性物質除去技術の開発	Development of Removal technology for the Radioactive Materials included in Farm Soil	行本修	農業機械学会誌	2012/03/01	Vol.74(2012)No.2
93	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	は 廃棄物熱処理実験プラントを用いた災害廃木材燃焼時の放射性セシウムの熱分配挙動および溶出特性		藤森崇, 土井妙子, 滝上英孝, 大迫政浩	廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集	2011/11/03	Vol.22(2011)
94			は 廃棄物・土壌処分技術手法開発等プロジェクト報告		遠藤和人 (国立環境研究所)	国立環境研究所 環境回復研究プログラム (PG1)の成果 [HP]	2013/07/01	HP (ppt)
95	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ば BAT (混気ジェット旋回流ポンプ) 等による汚染土壌の減容化	Gravel washing demonstration system and reducing the contaminated soil by BAT (Blend Air Tornado pump)	森本吉泰 (環境技研協), 橋間竜太 (笠原建設), 山下昭彦 (ワイレックス・リウオーター), 梶谷幹男 (原子力バックエンド推進セ)	デコミッションング技報	2013/06/10	特別号,Page.13-17
96	環境放射		ば バーミキュライトを模擬土壌としたセシウム除染条件の検討	Studies of Cs Decontamination Condition Using Vermiculite as Simulated Soil	吉田昂平, エルニジョハン, 松枝直人, 板垣吉晃, 青野宏通	環境放射能除染学会誌	2014/09/01	Vol.2, No.3(2014)
97	日本原子	減容化	ば パルスパワー放電を活用した骨材再利用による汚染コンクリートの減容化	Reduction of contaminated concrete waste by recycling aggregate with the aid of pulsed power discharge	Arifi E., 石松宏一, 飯笹真也, 浪平隆男, 坂本浩幸, 館幸男, 加藤博康, 重石光弘	Construction and Building Materials	2014/09/30	Vol.67, Part.B
98	J-STAGE	減容, 放射性	ふ 粉碎・選別技術総論	General Remarks of Comminution and Separation Technology	大和田秀二 (早稲田大学理工学術院)	Journal of MMIJ (資源・素材学会)	2007/12/01	Vol. 123, No. 12, p. 575-581
99			ふ 福島県除染技術実証事業 実地試験結果 (平成23年度)		福島県生活環境部	福島県	2012/04/01	報告書
100			ふ 腐敗性廃棄物 (草本類) の減容化と保管時温度変化に関する検討 (速報)	Study on the reducing content and tempreture change of putrefactive organic waste	加藤利崇, 水谷敦司, 川島哲文, 白井克己, 吉開博幸, 遠藤和人	廃棄物資源循環学会研究発表会 (第23回)	2012/10/22	セッションID : A9-2
101	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	ふ 福島第一原子力発電事故で汚染された堆肥の汚染原因と処分方法		佐藤理夫, 尾形宏樹, 塩谷昌之, 佐藤幹雄, 武田栄輝, 橋本久雄	廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集	2012/10/22	Vol.23(2012)
102			ふ 福島県除染技術実証事業 実施結果 (平成24年度第1回)		福島県生活環境部	福島県	2013/02/01	報告書
103			ふ 福島県除染技術実証事業 実施結果 (平成24年度第2回)		福島県生活環境部	福島県	2013/06/01	報告書
104	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	ふ 福島第一原子力発電所事故による汚染土壌からの放射性セシウムの除去と吸着		佐藤健二, 瀧内伸, 角田美里, 鈴木龍馬, 佐々木秀明, 坂本直道	分析化学	2013/06/27	Vol.62(2013)No.6
105			ふ 不燃系等減容化及びコンクリート技術適用プロジェクト報告		山田一夫 (国立環境研究所)	国立環境研究所 環境回復研究プログラム (PG1)の成果 [HP]	2013/07/01	HP (ppt)
106	CiNii	土壌, 放射性セシウム	ふ 福島県の磁性土壌に対する放射性セシウム濃度分析	Analysis of Radioactivity Concentration of Radioactive Caesium for Magnetically Separated Soils	佐々木侑輝, 浅木了, 岩田高広, 田島靖久, 松田達郎, 宮地義之, 中島和夫, 糠塚元気, 吉田浩司	RADIOISOTOPES	2013/07/01	vol. 62, no. 7, p. 461-464
107	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ふ 福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質汚染土壌の減容化手法 (1) 汚染土壌から分離した放射性セシウム吸着粘土の特性評価		高橋宏明, 石崎梓, 長田直之, 新井宏受, 菅井裕之, 松山成男, 石井慶造 (東北大学院)	日本原子力学会秋の大会予稿集 (CD-ROM)	2013/09/03	Vol.2013,Page.ROMBUN NO.D26
108	CiNii		ふ 福島県相馬郡飯館村および双葉郡浪江町における表層土壌中の粘土鉱物の特徴 (A17)		八田珠郎 (国際農林水産業研究センター), 根本清子 (国際農林水産業研究センター), 万福裕造 (国際農林水産業研究センター), 松本成夫 (国際農林水産業研究センター), 吉橋忠 (国際農林水産業研究センター), 山田裕久 (物質・材料研究機構)	粘土科学討論会講演要旨集	2013/09/04	vol.57, p.64-65
109	日本原子	分級	ふ 福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務報告書; 除染技術実証試験事業編 (受託研究)		渡辺将久, 田川明広	JAEA-Review	2014/03/01	2013-053,
110			ふ 福島県除染技術実証事業 実施結果 (平成25年度)		福島県生活環境部	福島県	2014/06/01	報告書
111			ふ 一土壌科学者としての考察と新提案-復興農学の原点を里山の活性に求めて-(特集 復興農学がめざすもの: 東日本大震災からの復興への貢献と課題)	An Examination and a Proposal from a Soil Scientist: Requesting activities at "Satoyama" to starting point of Japanese agronomy recovery	松本總	学術の動向	2014/07/01	vol.19, no.7, p.52-55
112	産業技術	減容化	ぶ 分級分析による飯館村農地土壌のセシウム吸着特性および放射性セシウムの分布 (口頭発表, 一般講演)		伊藤健一, 宮原英隆, 氏家亨, 武島俊達, 横山信吾, 中田弘太郎, 鈴木伸一, 鈴木正哉, 佐藤努, 八田珠郎, 山田裕久	粘土科学討論会講演要旨集	2013/09/04	Vol.57(2013),page72-73
113			へ 平成23年度「除染技術実証試験事業」の結果概要		内閣府原子力被災者生活支援チーム	環境省	2012/03/01	
114			へ 「平成24年度除染技術実証事業」に係る実証試験対象技術の選定結果及び「平成23年度除染技術実証事業」に係る評価結果の公表について		環境省水・大気環境局除染チーム (HP)	環境省	2012/10/23	
115			へ 「平成25年度除染技術実証事業」に係る実証試験対象技術の選定結果及び「平成24年度除染技術実証事業」に係る評価結果の公表について		環境省水・大気環境局除染チーム (HP)	環境省	2013/06/28	

通番	検索先	検索key	文献名	Title	著者	発行者・学会	発行時期	巻・号・頁
116			へ 「平成26年度除染技術実証事業」の対象技術の募集及び「平成25年度除染技術実証事業」の評価結果について		環境省水・大気環境局除染チーム (HP)	環境省	2014/02/24	
117	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ 放射性セシウム汚染土壌の洗浄処理に関する検討	Study of Soil Washing Treatment for Radioactive Cesium Contaminated Soil	中島卓夫, 松生隆司, 大山将, 林茂郎, 高馬崇(鴻池組), 田川明広(日本原子力研究開発機構)	鴻池組技術研究報告	2012/07/01	Vol.22,Page.1-8
118	地盤工学	放射性セシウム	ほ 放射性セシウム含有土壌の分級洗浄処理に関する基礎検討		大山将, 中島卓夫, 保賀康史, 松生隆司, 吉岡由郎, 西村良平	地盤工学研究発表会発表講演集	2012/07/01	第47回, page1967-1968
119		洗浄	ほ 放射能汚染土壌の土壌洗浄処理の検討		井出一貴, 三浦俊彦, 神徳敬	地盤工学研究発表会発表講演集	2012/07/01	第47回, page1885-1886
120	土木学会	放射性セシウム	ほ 放射性セシウム汚染土壌の多段階土壌洗浄処理		田邊康太, 奥田信康, 舟川将史	土木学会年次学術講演会講演概要集	2012/09/05	Vol.67(2012)
121	土木学会	放射性セシウム	ほ 放射性セシウム含有砕石の洗浄処理に関する基礎的検討		大山将, 中島卓夫, 保賀康史, 松生隆司, 吉岡由郎, 西村良平	土木学会年次学術講演会講演概要集	2012/09/05	Vol.67(2012)
122	土木学会	洗浄	ほ 放射性汚染物質を含む土壌の洗浄処理に係る基礎的検討		岩田将英, 山本達生, 清水英樹	土木学会年次学術講演会講演概要集	2012/09/05	Vol.67(2012)
123	CiNii		ほ 放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化へのマイクロバブルフローテーション法の適用(第25回:震災廃棄物の処理・リサイクルと課題)		日下英史, 石山宏二, 奈良崎則雄他	環境資源工学会シンポジウム「リサイクル設計と分離精製技術」発表資料集	2012/09/06	第25回
124	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ 放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化—マイクロバブルフローテーションを利用したアトリション分級洗浄— 放射能除染技術		石山宏二(西松建設), 日下英史(京大), 奈良崎則雄(湘南数理研究会), 白石稜威男(タクマ精工)	環境浄化技術	2012/11/01	Vol.11, No.6, Page.24-28
125	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ 放射性物質による環境汚染の対策技術—除染除去物の減容化と保管・処分技術— 放射能除染技術		横山勝彦, 土田充, 西川洋二, 西村晋一(清水建設)	環境浄化技術	2012/11/01	Vol.11, No.6, Page.12-17
126	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ 放射能土壌の高速除染処理システム—放射能粘土質土壌の除染処理と減容化技術— 放射能除染技術		山内荘平(EMCOMホールディングス)	環境浄化技術	2012/11/01	Vol.11, No.6, Page.34-38
127			ほ 放射性物質と土壌汚染		保高徹生, 駒井武	地盤工学会誌	2012/12/01	Vol.60(12),page34-35
128	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	ほ 放射性セシウム除染と戦略的農地資源保全	Radioactive Cesium Decontamination and Strategic Farmland Resource Conservation	有田博之, 橋本禪, 吉川夏樹, 原田直樹, 保高徹生, 野中昌法, 岩崎有美, 宮津進	農業農村工学会論文集	2012/12/01	Vol.80, No.6, p.555-561
129	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ 放射性物質に汚染された土壌の除染・減容化技術	Decontamination and Volume Reduction Process for Radiation Contaminated Soil	竹田尚弘, 村上吉明, 石井豊, 井出昇明(神鋼環境ソリューション)	神鋼環境ソリューション技報	2013/02/01	Vol.9, No.2, Page.15-20
130	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ 放射線防護 放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化技術		保高徹生(産業技術総合研地圏資源環境研究部門)	高圧ガス	2013/03/01	Vol.50, No.3, Page.194-198
131	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	ほ 放射性セシウム含有土壌への酸抽出方法の適用性に関する基礎的検討		保高徹生, 川本徹, 駒井武	RADIOISOTOPES	2013/04/26	Vol.62(2013)No.4
132	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ 放射性物質汚染土壌等からの乾式Cs除去技術の開発		本間健一, 三浦啓一(太平洋セメント), 佐々木忠志(日揮), 木村武(農業, 生物系特定産業技術研究機構), 万福裕造(国際農林水産研究セ), 真保崇(東京電力)	全国都市清掃会議	2013/05/01	Vol.66, No.313, Page.301-305
133	国立環境研究所		ほ 放射性物質を含む廃棄物の焼却処理		大迫政浩	産業機械	2013/06/01	Vol.753, page24-29(2013)
134	国立環境研究所		ほ 放射性物質汚染廃棄物の適正処理に向けた課題		大迫政浩	環境放射能除染学会誌	2013/06/01	Vol.1, No.1(2013)page37-38
135	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ 放射性物質汚染土壌等からの乾式Cs除去技術の開発	Development of Dry Process for Removing Cs from Soil Contaminated with Radioactive Materials	本間健一, 三浦啓一(太平洋セメント), 佐々木忠志(日揮), 木村武(農業, 食品産業技術総合研究機構), 万福裕造(国際農林水産研究セ), 真保崇(東京電力)	太平洋セメント研究報告	2013/06/25	No.164, Page.53-60
136			ほ 放射性セシウム含有バイオマスの減容化に関する研究		中島卓夫, 松生隆司, 大山将, 谷口美希	鴻池組技術研究報告(2013年度)	2013/07/17	p. 21-28
137	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ 放射性セシウムの土壌吸着反応における数値シミュレーション解析の進展	Recent Advances of Numerical Simulation Studies for Radioactive Cesium Adsorption on Soil Materials	奥村雅彦, 中村博樹, 町田昌彦(日本原子力研究開発機構システム計算科セ)	RIST News	2013/07/19	No.55, Page.24-33
138			ほ 放射性物質を含む下水汚泥の減容化について—福島第一原発事故の影響への取り組み—				2013/08/01	
139	土木学会	減容化	ほ 放射能汚染土壌の除染・減容化システムの開発		辻野修一, 前田幸男, 歌川紀之, 楠岡弘康, 森晴夫, 木俣陽一, 京藤敏達	土木学会年次学術講演会講演概要集	2013/09/04	Vol.68(2013)
140	産業技術	減容化	ほ 放射性セシウム含有土壌の土壌洗浄法の適用性評価試験		保高徹生, 大山将, 佐藤透	環境地盤工学シンポジウム	2013/09/18	第10回, p.301-306

通番	検索先	検索key	文献名	Title	著者	発行者・学会	発行時期	巻・号・頁	
141	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化システム—新しい洗浄技術による効率的な減容化と濃縮残渣処理の自動化による被曝線量の低減化—		毛利光男(清水建設)	建設機械	2013/10/01	Vol.49, No.10, Page.64-72
142	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性物質を含む汚染土壌処理システム及び焼却灰洗浄減容化システム		佐藤敦政(アース), 豊原治彦(京大)	コンクリート技術大会	2013/12/16	Vol.3rd, Page.ROMBUNNO.KOENI, 10
143	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性物質に汚染された土壌の除染・減容化技術—第2報—	Decontamination and Volume Reduction Process for Radiation Contaminated Soil	竹田尚弘, 小倉正裕, 井出昇明(神鋼環境ソリューション)	神鋼環境ソリューション技報	2014/02/01	Vol.10, No.2, Page.2-9
144			ほ	放射能汚染土砂の分級・減容化実証実験について		安藤淳也, 高畑修, 櫻澤一朝, 熊田正次郎ほか(福島県道路総室H25ワーキンググループ)	ふくしまの未来を拓く業務発表会(平成25年度, 福島県)	2014/02/12	no. 10 (ppt)
145			ほ	放射性セシウムを吸着し含水汚泥を減容化させる除染用土のう-岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業(平成25年度)実証試験結果報告—		凸版印刷株式会社東日本事業本部東日本事業部(宮城県)	岩手県	2014/03/31	
146	土壌物理	放射性	ほ	放射性物質問題—土壌物理に求められること—	Radioactive material issue—What should soil physics do?	溝口勝(東京大学大学院農学生命科学研究科)	土壌の物理性	2014/04/01	No.126, p.3-10
147	日本原子	放射, 汚染, 土壌	ほ	放射能汚染土壌の洗浄再生化技術 最新のセンシング/マニピュレーション融合化技術(2)		石山新太郎, 山下学	検査技術/検査技術編集委員会	2014/04/01	2014年4月号, page45-49
148	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性物質を含む汚染土壌等の洗浄と減容 バイオによる放射能除染への挑戦		豊原治彦(京大大学院農学研究科), 佐藤敦政(アース)	生物工学会誌	2014/05/25	Vol.92, No.5, Page.225-227
149			ほ	放射能汚染植物バイオマス減容化バイオ技術の開発		加藤純一, 金原和秀, 佐々木健, 中村雅哉, 中島田豊, 平井浩文, 大塚祐一郎, 新谷政己	生物工学会誌	2014/06/01	vol. 92, No. 5, Page. 225-227no. 6, p. 287-290
150	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の減容化(その1:化学的除染)		木下哲一, 谷本祐一(清水建設技研)	地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集(CD-ROM)	2014/06/19	Vol.20th, Page.96-97
151	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の減容化(その2:表面剥離の試み)		谷本祐一, 木下啓一(清水建設技研)	地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集(CD-ROM)	2014/06/19	Vol.20th, Page.440-441
152			ほ	放射能汚染土砂の分級・減容化実証実験について		安藤淳也, 高畑修, 櫻澤一朝, 熊田正次郎(福島県 県中建設事務所)	東北地方整備局管内業務発表会(平成26年度)	2014/06/24	no. 1-10 (ppt)
153	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウム含有土砂への土壌洗浄技術の事前適用性評価試験—道路維持管理に伴い発生した土砂の減容化に向けて—		宮口新治, 上堂蘭四男, 門間聖子, 大野敦史, 奥山博樹, 竹本麻理子(応用地質), 安藤淳也, 高畑修(福島県土木部), 保高徹生(産業技術総合研), 小峯秀雄(茨城大)	地盤工学研究発表会発表講演集(CD-ROM)	2014/07/01	Vol.49th, Page.2017-2018
154			ほ	放射性汚染物質の減容化に伴うセシウム排出挙動実証試験	Experimental study on cesium extraction during volume reduction of radioactive contaminants	立田潤一郎, 竹村公太郎	リバーフロント研究所報告	2014/09/01	Vol.25, page57-64
155			ほ	放射性汚染物質の減容化に伴うセシウム排出挙動実証試験		立田潤一郎(水循環・まちづくりグループ)	リバーフロント研究所研究発表会(第22回:平成26年度)	2014/09/05	ppt
156	土木学会	減容化	ほ	放射性物質の固定化・減容化同時処理技術の実証		山本達生, 岩田将英, 野田謙司, 清水英樹, 芝本直尚	土木学会年次学術講演会講演概要集	2014/09/10	Vol.69(2014)
157	土木学会	減容化	ほ	放射性物質汚染土壌の小型簡易設備による減容化技術の開発		野田兼司, 山本達生, 岩田将英, 清水英樹	土木学会年次学術講演会講演概要集	2014/09/10	Vol.69(2014)
158	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性Csの土壌粒度別分布傾向と分級による減容化への取り組み		伊藤健一(宮崎大)	粘土科学討論会講演要旨集	2014/09/24	Vol.58th, Page.26-27
159	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の分級分析による減容化と農業用堰の受動的処理効果の検討		伊藤健一(宮崎大国際連携セ), 伊原昌史, 松田達郎(宮崎大工), 鈴木正哉(産業技術総合研), 八田珠郎(国際農林水産業研究セ), 山田裕久(物質, 材料研究機構)	粘土科学討論会講演要旨集	2014/09/24	Vol.58th, Page.94-95
160	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の減容化		木下哲一, 谷本祐一(清水建設技研)	Hedoro	2014/09/30	No.121, Page.42-45
161			ほ	放射性物質含有下水汚泥(指定廃棄物)の減容化実証事業(減容化処理の完了)中間報告		環境省指定廃棄物対策担当参事官室	環境省	2014/11/06	ppt
162	日本原子	洗浄	ほ	放射能汚染土壌洗浄処理における高濃縮汚染残土固形化処理性能評価	Performance evaluation of a solidification process for highly concentrated radiation contaminated surplus soil	石山新太郎, 大谷和久, 山下学	化学工学論文集	2014/11/20	Vol.40, No.6, p.466-469
163			ほ	放射性物質を含む作物残さ・雑草・枝葉等の安定・減容化技術		中央農業総合研究センター	農研機構		HP
164			ぼ	ボールミル法による土壌中からのセシウムの除去			(独)物質・材料研究機構	2013/01/11	HP
165			よ	熔融塩法によるセシウムの土壌から水溶液中への抽出			(独)物質・材料研究機構	2013/01/11	HP
166	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	よ	熔融塩法による土壌からのセシウムの抽出 資源・素材開発技術の展望		原田幸明(物質・材料研究機構)	ケミカルエンジニアリング	2014/01/01	Vol.59, No.1, Page.84-89

放射性物質汚染土壌の減容化に関する情報収集・整理業務委託(文献一覧) (各文献の分類)

通番	検索先	検索key	文献名	Keywords	文献		大分類		減容化手法					対象物			対象地			
					PDF_Link	URL_Link	減容化手法	吸着・移動	分級(乾)	洗浄(湿)	焼却	溶融	その他	土壌	植物等	廃棄物	1F外	1F内		
1	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	あ	亜臨界水熱爆砕法による放射性廃棄物処理	減容, セシウム, 廃棄物処理, プラント, 熱処理, 試運転, 土壌	<a href="#">●</a>		●						●				●		
2	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	あ	亜臨界水熱爆砕法による放射性セシウム除去・減容化技術の開発	セシウム同位体, 放射性同位体, 廃棄物処理, 放射性廃棄物, 土壌汚染, 減容, 熱処理, 破砕	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●						●				●		
3	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	い	一般焼却飛灰からのセシウム溶出特性に関する研究	飛灰, 放射性セシウム, 遠心分離	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>											●	●	
4			い	飯館村蕨平地区における可燃性廃棄物減容化事業について(概要)		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●			●							●	●	
5	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	い	飯館村における空気揚土攪拌式洗浄装置を用いたセシウム汚染土壌の減容化の実証試験	土壌汚染, 放射能汚染, セシウム同位体, 放射性同位体, セシウム, 土壌浄化, 洗浄, 減容, 実証実験, 福島	<a href="#">●</a>		●						●				●	●	
6	J-STAGE	セシウム, 吸着	い	茨城県南部土壌のセシウム吸着特性	セシウム, 土壌, 吸着, 黒ボク土, 分配係数	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>											●	●	
7			い	飯館村蕨平地区における可燃性廃棄物減容化事業について—福島県全体の復興のために—		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●			●							●	●	
8	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	え	X線分光法と計算科学による土壌中セシウムの評価	セシウム, 土壌, X線分光法, 電子状態, 第一原理計算	<a href="#">●</a>												●	●	
9	国会図書	—	お	汚染土壌からのセシウム溶離回収技術の開発(1)全体計画	汚染土壌, 除染, セシウム, 有機酸, 二次廃棄物, モバイル装置	<a href="#">●</a>		●						●				●	●	
10	国会図書	—	お	汚染土壌からのセシウム溶離回収技術の開発(2)溶離試験	有機酸, シュウ酸, 常圧, Cs溶離, 汚染土壌	<a href="#">●</a>		●						●				●	●	
11	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	お	汚染土壌対策 放射性Cs汚染土の浄化・減容化技術の開発—土壌分級・洗浄技術の適用—	汚染土壌, 放射能除染, 減容, 放射線事故, 放射能汚染, 土壌浄化, セシウム137, 放射線量, 分級, スクラビング	<a href="#">●</a>		●	●					●				●	●	
12	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	お	汚染された農地土壌からセシウムを99%除去—汚染土壌などの大幅な減容化に期待—	減容化, 農地除染, 放射性セシウム, セシウム除去, 昇華技術	<a href="#">●</a>		●			●			●				●	●	
13			お	オゾンを用いた排ガス処理装置付輻射熱分解炉による有機物等減容化技術—岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業(平成25年度)実証試験結果報告—	しいたけ廃ほだ木(農林業系副産物)	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●			●			●				●	●	
14	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	お	汚染土壌の貯蔵負荷低減のためのセシウム溶出回収処理(3)セシウム溶出回収処理後の線量低減化の計算	貯蔵, 放射性廃棄物, 土壌, セシウム同位体, 放射性同位体, 線量率, 減容	<a href="#">●</a>		●						●				●	●	
15	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	お	汚染土壌からの放射性セシウムの除去・回収		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●						●					●	●
16	GiNii	減容化	お	汚染水浄化, 汚染土壌減容化のキーテクノロジーは固液分離技術(小特集 粒子・流体プロセス部会の最新動向と活動報告: 震災復興への粒子・流体プロセス工学的アプローチ)		<a href="#">●</a>		●						●					●	●
17			か	画期的なセシウム吸着剤を開発			<a href="#">●</a>	●											●	●
18	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	か	界面化学的分散制御高せん断解砕による放射能汚染土壌洗浄 福島県における汚染土壌洗浄処理フィールド試験(第1報)	Chemical Interface Controlled Dispersion, Contaminated Soil, Fission Product, Chemical Interface Control, High-Speed Shearing Washing, Sieve Classification, Filter Press, Base Equilibrium Point	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●						●					●	●
19	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	か	環境汚染と除染 住民への理解と廃棄物の減容化が課題	ヨウ素, 原子炉事故, セシウム同位体, 放射能除染, 放射能放出, 放射能汚染, 貯蔵, 放射性廃棄物, 生態系, 表層土	<a href="#">●</a>		●										●	●	

通番	検索先	検索key	文献名	Keywords	文献		大分類		減容化手法				対象物			対象地					
					PDF_Link	URL_Link	減容化手法	吸着・移動	分級(乾)	洗浄(湿)	焼却	熔融	その他	土壌	植物等	廃棄物	1F外	1F内			
20	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	か	カチオン種の異なる各種ゼオライトによるセシウムイオンの回収と固定化	ゼオライト, セシウム, 吸着, 固定化, イオン交換	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●								●				
21	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	か	乾式Cs除去技術で生成する浄化処理物の各種土工資材評価	放射性セシウム, 浄化処理物, 重金属溶出量, 土工資材	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●							●				
22			か	家畜ふん堆肥に含まれる放射線セシウムについて		<a href="#">●</a>			●								●				
23	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	か	革新的環境浄化技術の開発 ナノカルシウム鉄による放射性セシウム汚染土壌の乾式除染技術	公害対策, 浄化, 技術開発, カルシウム, 酸化カルシウム, 長さ, 複合体, ナノ構造, ナノ粒子, 乾式法, 土壌汚染, 重金属, 不溶化, 鉄粉, 添加物効果, 磁力選鉱, 表層, 土壌, 粒径, 濃度, 比表面積, 吸着, セシウム同位体, 放射性同位体, 分離, 施設, 廃棄物処分施設, 埋立地, 除去, 放射能汚染	<a href="#">●</a>		●		●						●		●			
24	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	き	期待高まる除染技術実証事業 環境省「除染技術実証事業」の概要	環境汚染, 放射能汚染, 放射能除染, セシウム同位体, 放射性同位体, 環境放射性核種移動, 吸着剤, 水洗, インターロッキングブロック, コンクリートブロック, 反応促進剤, 熱分解	<a href="#">●</a>		●									●		●		
25			き	基礎物性・挙動解析プロジェクト報告		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●									●		●	
26	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	く	草木類を含む土壌の熔融処理試験	熔融, セシウム, 揮散分離, 土壌, 草木類	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●				●					●	●		●	
27			く	空気揚土攪拌式洗浄装置を用いた放射性セシウム汚染土壌の減容化方法の開発	土壌洗浄, 減容化, 放射性セシウム, 磁気分離, 凝集沈殿, 脱水, サイクロン分級	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●								●		●	
28	J-STAGE	-	げ	現地土壌におけるセシウム固定 復興農学が目指すもの—東日本大震災からの復興への貢献と課題—		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●									●		●	
29	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	こ	高温加熱処理による高濃縮汚染残土の高減容化に関する研究 福島県における汚染土壌洗浄処理フィールド試験(第4報)	Chemical Interface Controlled Dispersion, Contaminated Soil, Fission Product, Mordenite, High-Speed Shearing Washing, Decontamination, Volume Reduction, FP Filter, Cs, Fission Product	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●				●						●		●	
30	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	こ	高放射能汚染土壌の界面化学的分散制御高速せん断流解砕洗浄による再生土化	放射能汚染土壌, 高せん断解砕, 洗浄再生, フィルタープレス, サイクロン分級	<a href="#">●</a>		●		●								●		●	
31	環境放射	-	こ	湖沼底泥の湿式触媒酸化法による減容化と除染効果	Decontamination of cesium contamination in lake sediment, Wet oxidation method, Reactive oxygen water, Washout	<a href="#">●</a>		●		●								●		●	
32	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	こ	耕起した放射能汚染水田を除染するための濁水回収システムを組み込んだ水による土壌攪拌工法の開発	福島第1原子力発電所事故, 放射能汚染水田土壌, 除染, 代かき, 放射性Cs, 除染率	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●								●		●	
33	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	こ	高放射能汚染土壌洗浄システムにおける水循環システムの性能評価	放射能汚染土壌, 高せん断解砕, 洗浄再生, 核分裂生成物, 水循環装置, 減容化, 浄化減容, 除染, 放射性, セシウム, 土壌, 産業用, 焼却炉, ゴミ, システムの検討	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●								●		●	
34	J-STAGE	減容, 放射性	さ	産業用ゴミ焼却炉を用いた放射性セシウム汚染土壌の減容除染システムの検討		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●				●							●		●

通番	検索先	検索key	文献名	Keywords	文献		大分類		減容化手法					対象物			対象地		
					PDF_Link	URL_Link	減容化手法	吸着・移動	分級(乾)	洗浄(湿)	焼却	溶融	その他	土壌	植物等	廃棄物	1F外	1F内	
35	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	さ	最新の土壌・地下水汚染浄化技術 放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化システムの開発 効率的な浄化・減容化と作業員の被曝線量の大幅な低減を可能とした新しい洗浄技術の実用化	放射能汚染, セシウム同位体, 放射能除染, 被曝線量, 自動化, 減容, 放射能測定, 産業衛生, 労働安全, 放射線防護, 洗浄, 土壌浄化	<a href="#">●</a>		●		●					●			●	
36	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ざ	雑草繁茂域における植物体および表層土の効率的な除染および減容化方法	雑草, 放射性同位体, 放射能除染, 植物成長阻害剤, 表層土, 係数, 実証実験	<a href="#">●</a>		●						●		●		●	
37	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	し	湿式分級洗浄および天然鉱物等による農地土壌等に含まれる放射性セシウム除去方法の実践的検討	radiocesium, released radiocesium from organic matter, radiocesium-contaminated soil, wet classification, volume reduction	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●										●	
38	J-STAGE	放射性, 減容	し	焼却施設における廃棄物減容化と放射性セシウムの挙動	放射性セシウム, 焼却, 灰溶融, ガス化溶融, 減容化	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●			●							●	●
39	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	じ	除染へ挑戦する建設土木技術		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●					●			●	●
40	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	じ	地盤環境中の放射性物質の挙動 <特集>汚染土壌・廃棄物等の処理		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●						●			●	●
41	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	じ	除染作業により除去された土壌等の除去物の仮置場の設計・建設および維持・管理	Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, removed contaminants, temporary storage facility, facility requirements, management-related requirements, decontamination pilot project, technical know-how	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●						●			●	●
42	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	じ	ジオマテリアルを利用した除染	発電所, モルデナイト, 粘土鉱物, クリノプテロライト, 放射能除染, 水, セシウム同位体, 放射性同位体, 材料, 原子炉事故, 沸石, 吸着剤, 吸着	<a href="#">●</a>		●		●					●			●	●
43	環境放射	ー	じ	磁化Na-P1 型ゼオライトによる土壌Csの除去技術の開発	Decontamination Technique, Composite Material of Na-P1 Type Zeolite and Magnetite, Radioactive Cs in Soil	<a href="#">●</a>		●						●	●			●	●
44	土木学会	放射性	じ	除染除去土壌に対する分級時の洗浄技術の適用性検討	除染除去土壌, 減容化, 分級, 超音波, キャビテーション, ジェット	<a href="#">●</a>		●		●					●			●	●
45	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	じ	除染可燃物焼却灰(飛灰・主灰)の減容固化技術の開発	放射性セシウム, 焼却灰, 超流体工法, 固化, 減容	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●						●			●	●	●
46			じ	除染廃棄物の減容(2.6) 福島第一原子力発電所事故に係るサイト外緊急時対応の調査及び環境修復活動の検討に関する報告		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●	●	●	●		●	●	●	●	●
47			じ	磁気分離による汚染土壌の減容化の試み		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●						●	●			●	●
48	日本原子	洗浄	じ	除染技術選定・評価等業務報告書(平成24年度)ー環境省平成24年度除染技術実証事業(受託研究)ー		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●	●	●	●	●	●			●	●

通番	検索先	検索key	文献名	Keywords	文献		大分類		減容化手法					対象物			対象地		
					PDF_Link	URL_Link	減容化手法	吸着・移動	分級(乾)	洗浄(湿)	焼却	熔融	その他	土壌	植物等	廃棄物	1F外	1F内	
49	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	じ	除染技術～物理分離・分級と土壌添加による低温加熱の有効性 粉体技術のイノベーション	粉体工学, 技術革新, 除去, 浄化, 分離, 分級, 土壌, 添加, 低温加熱, 有効性, 放射性物質, 環境修復, 処理, 単位操作, 吸着剤, 粉碎, バイオマス, 減容, セシウム同位体, 放射性同位体, 改変, 炭化, 燃焼, 安定化	<a href="#">●</a>		●		●					●			●	
50	環境放射	ー	じ	事故由来放射性物質汚染廃棄物の熱処理に関するこれまでの研究成果	Radioactive cesium, Incineration, Melting, Behavior, Refractory	<a href="#">●</a>		●		●					●			●	
51	地盤工学	減容化	じ	除染除去土壌に対する超音波洗浄装置の適用性検討	除染除去土壌, 超音波洗浄装置, 分級・減容化	<a href="#">●</a>		●		●					●			●	
52	J-STAGE	ー	じ	除染技術の高度化—セシウムの濃縮分離(放射性物質で汚染された土壌からの熱処理によるセシウム除去) 復興農学が目指すもの—東日本大震災からの復興への貢献と課題—		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●					●			●	
53	J-STAGE	減容	じ	除染廃土の湿式減容技術 復興農学が目指すもの—東日本大震災からの復興への貢献と課題—		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●					●			●	
54	日本原子	洗浄	じ	除染技術選定・評価等業務報告書(平成25年度) —環境省平成25年度除染技術実証事業(受託研究) —		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●	●	●	●		●	●		●	
55	国会図書	放射性物質	す	スクラビング・フローテーションを用いた土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の効率的な浄化と減容化	放射性物質汚染土壌, 放射性セシウム, 土壌洗浄, スクラビング・フローテーション, 減容化, 浄化	<a href="#">●</a>		●		●					●			●	
56	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	す	水稲栽培試験田における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (2)水稲栽培試験におけるセシウムの挙動評価	水稲栽培, 放射性セシウム, ゼオライト散布, カリウム施肥, 玄米	<a href="#">●</a>			●						●			●	
57	CiNii	放射性セシウム	す	水稲栽培試験田における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究: (1) 試験計画および現地概要	水稲栽培, 放射性セシウム, ゼオライト散布, カリウム施肥, 玄米	<a href="#">●</a>			●						●			●	
58	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	す	水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (1)全体計画と現地の概要		<a href="#">●</a>			●						●			●	
59	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	す	水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (2)放射線測定と汚染状況の評価		<a href="#">●</a>			●						●			●	
60	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	す	水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (3)荒搔き作業と除染効果の評価		<a href="#">●</a>			●						●			●	
61			せ	洗浄・水処理プロジェクト報告		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●								●	
62	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ち	超電導磁石を用いたセシウム汚染土壌の除染に向けた土壌の磁気分離に関する研究	超伝導磁石, セシウム同位体, 放射性同位体, 土壌, 除去, 浄化, 磁力分離, 震害, 発電所, 原子炉事故, 減容, 処理, 分級, 磁力選鉱, 吸着, 磁化率, 粘土鉱物, X線回折, 定性分析, 定量分析, 比率	<a href="#">●</a>		●						●	●		●		
63	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ち	超電導磁石を用いた高勾配磁気分離によるCs汚染土壌の減容化	超伝導磁石, 磁力選鉱, セシウム同位体, 放射性同位体, 土壌, 減容, 粘土鉱物, 土壌汚染	<a href="#">●</a>		●						●	●		●		
64	土木学会	放射性セシウム	つ	土の粒度分布に注目した放射性物質吸着土壌の減容化に関する検討	放射性物質, 汚染土壌, 減容化	<a href="#">●</a>		●		●					●			●	
65	CiNii	セシウム, 吸着	て	天然鉱物によるセシウムの吸着に関するデータベースの一例		<a href="#">●</a>			●									●	
66	地盤工学	セシウム	で	電気泳動法を利用したカオリン粘土に含有するセシウムの除去に関する実験・解析	セシウム, 電気泳動法, 室内実験	<a href="#">●</a>		●						●	●			●	
67			と	特殊ジオテキスタイル製袋を活用した水路底質等の脱水減容化—岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業(平成24年度)実証試験結果報告—	道路側溝土砂	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●						●	●			●	

通番	検索先	検索key	文献名	Keywords	文献		大分類		減容化手法					対象物			対象地			
					PDF_Link	URL_Link	減容化手法	吸着・移動	分級(乾)	洗浄(湿)	焼却	溶融	その他	土壌	植物等	廃棄物	1F外	1F内		
68	日本原子	放射性セシウム	ど	土壌の原位置加熱による放射性セシウムの除去可能性の検討		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●				●				●			●	
69	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	ど	土壌からのセシウムの分離		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●							●			●	
70	日本原子	減容化	ど	土壌へのセシウム吸着機構：第一原理計算による白雲母のほつれたエッジサイトへの放射性セシウム吸着研究	frayed edge, muscovite, clay mineral, radioactive cesium, density functional theory	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●							●			●	
71	環境放射	ー	ど	土壌からのCs除去を目的とした磁化Na-P1型ゼオライトの合成	Fly-ash, Na-P1 Type Zeolite, Magnetite, Magnetic Zeolite, Radioactive Cs Decontamination	<a href="#">●</a>		●						●		●			●	
72	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ど	土壌洗浄を用いた放射性Cs汚染土壌の減容化と濃縮残渣処理の自動化について	放射能汚染、セシウム同位体、減容、廃棄物処理、放射性廃棄物、スラッジ処理、放射能除染、洗浄、スクラップ、サイクロン【分離】	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
73	CiNii	ー	ど	土壌中の放射性セシウムの安定性に関する研究 (A20)		<a href="#">●</a>			●							●			●	
74	環境放射	ー	ど	土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の浄化・減容化および濃縮残渣処理の自動化	Soil washing, Radioactively contaminated soil, Soil remediation, Volume reduction, Radiation exposure reduction	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
75			ど	土壌の浄化・減容技術に関する技術情報		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●	●	●	●	●		●			●	
76	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ど	土壌細粒分等からの常温常圧下でのCs分離および分離したCsの吸着・濃縮による減容化技術ー放射性物質による環境汚染と対策の現状ー	原子炉事故、放射能汚染、セシウム同位体、溶出、吸着剤、減容、フッ化物、薬液注入、再利用、ヘキサシアノ鉄酸塩、土壌浄化	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
77	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ど	土壌洗浄による除去土壌の浄化・減容化ー放射性物質による環境汚染と対策の現状ー	原子炉事故、放射能汚染、土壌浄化、放射能除染、分級、研磨、砂、土壌、環境修復、セシウム同位体、放射性同位体	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
78	土壌物理	放射性	ど	土壌への放射性Csの吸着メカニズム	フレイドエッジサイト、放射性Cs捕捉ポテンシャル (RIP)	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●							●			●	
79	土壌物理	放射性	ど	土壌中の放射性Csの移動	放射性Cs、有機コロイド、イオン交換選択性、遅延係数	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●							●			●	
80			ど	土壌から作物へ、セシウムの移行とその要因		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●							●			●	
81			ど	道路維持管理に伴い発生する放射性セシウム含有土砂の分級洗浄処理実験	放射性セシウム、土壌洗浄法	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
82	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	な	ナノカルシウムによる放射性セシウム汚染土壌の除染技術	土壌、カルシウム、放射能除染、セシウム同位体、原子炉事故、福島、ナノ粒子、酸化カルシウム、鉄、複合体	<a href="#">●</a>		●						●		●			●	
83	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	な	ナノバブル水を用いた放射性物質汚染側溝汚泥の洗浄減容化実証試験	放射能除染、排水溝、スラッジ処理、放射性同位体、水、道路、土壌、粘土、回収、減容	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
84			ね	熱処理減容化等プロジェクト報告		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●				●				●			●	



通番	検索先	検索key	文献名	Keywords	文献		大分類		減容化手法					対象物			対象地			
					PDF_Link	URL_Link	減容化手法	吸着・移動	分級(乾)	洗浄(湿)	焼却	溶融	その他	土壌	植物等	廃棄物	1F外	1F内		
104	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	ふ	福島第一原子力発電所事故による汚染土壌からの放射性セシウムの除去と吸着		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>									●			●	
105			ふ	不燃系等減容化及びコンクリート技術適用プロジェクト報告		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●											●	●
106	CiNii	土壌、放射性セシウム	ふ	福島県の磁性土壌に対する放射性セシウム濃度分析	土壌、放射性セシウム、磁性成分、非磁性成分	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●						●		●			●	
107	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ふ	福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質汚染土壌の減容化手法(1)汚染土壌から分離した放射性セシウム吸着粘土の特性評価	放射性セシウム、粘土、土壌、サイズ分画	<a href="#">●</a>										●			●	
108	CiNii		ふ	福島県相馬郡飯館村および双葉郡浪江町における表層土壌中の粘土鉱物の特徴(A17)		<a href="#">●</a>										●			●	
109	日本原子	分級	ふ	福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務報告書；除染技術実証試験事業編(受託研究)		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●	●	●	●	●	●	●			●	
110			ふ	福島県除染技術実証事業_実施結果(平成25年度)		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●	●	●	●	●	●	●			●	
111			ふ	一土壤科学者としての考察と新提案ー復興農学の原点を里山の活性に求めてー(特集 復興農学がめざすもの：東日本大震災からの復興への貢献と課題)		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>									●			●	
112	産業技術	減容化	ぶ	分級分析による飯館村農地土壌のセシウム吸着特性および放射性セシウムの分布(口頭発表、一般講演)	放射性セシウム、分級、細粒分、減容化、飯館村	<a href="#">●</a>		●		●						●			●	
113			へ	平成23年度「除染技術実証試験事業」の結果概要		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●	●	●	●	●	●	●			●	
114			へ	「平成24年度除染技術実証事業」に係る実証試験対象技術の選定結果及び「平成23年度除染技術実証事業」に係る評価結果の公表について		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●	●	●	●	●	●	●			●	
115			へ	「平成25年度除染技術実証事業」に係る実証試験対象技術の選定結果及び「平成24年度除染技術実証事業」に係る評価結果の公表について		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●	●	●	●	●	●	●			●	
116			へ	「平成26年度除染技術実証事業」の対象技術の募集及び「平成25年度除染技術実証事業」の評価結果について		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●	●	●	●	●	●	●			●	
117	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の洗浄処理に関する検討	セシウム同位体、放射性同位体、土壌汚染、土壌、発電所、原子炉事故、放射能除染、実証実験、洗浄、減容	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
118	地盤工学	放射性セシウム	ほ	放射性セシウム含有土壌の分級洗浄処理に関する基礎検討	放射性セシウム、土壌洗浄、湿式分級	<a href="#">●</a>		●		●	●					●			●	
119		洗浄	ほ	放射能汚染土壌の土壌洗浄処理の検討	放射性物質、土壌汚染、洗浄処理	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
120	土木学会	放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の多段階土壌洗浄処理	mechanical splices, cyclic loading, load displacement curve, strain distribution	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
121	土木学会	放射性セシウム	ほ	放射性セシウム含有砕石の洗浄処理に関する基礎的検討	放射性セシウム、土壌洗浄、湿式分級、吸着、砕石、表面研磨	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
122	土木学会	洗浄	ほ	放射性汚染物質を含む土壌の洗浄処理に係る基礎的検討	RBSM, Mechanical anchorage, Anchorage failure	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
123	CiNii		ほ	放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化へのマイクロバブルフローテーション法の適用(第25回:震災廃棄物の処理・リサイクルと課題)		<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
124	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化ーマイクロバブルフローテーションを利用したアトリクション分級洗浄ー放射能除染技術	セシウム同位体、放射性同位体、土壌汚染、減容、気泡、浮遊選鉱、分級、洗浄、シルト、粘土、微粒子、吸着、吸着、固液分離、廃棄物、抑制、濃縮、放射能除染、体重減少、実証実験、放射能汚染	<a href="#">●</a>		●			●					●			●	
125	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ほ	放射性物質による環境汚染の対策技術ー除染除去物の減容化と保管・処分技術ー放射能除染技術	放射性物質、廃棄物減量化、土壌、洗浄、分級、スクラビング、浮遊選鉱、焼却、灰、凝固、混合セメント、コンクリート、充填、閉込め、鉛ガラス、放射線遮蔽材、事故、放射能除染、放射能汚染	<a href="#">●</a>		●		●	●					●			●	

通番	検索先	検索key	文献名	Keywords	文献		大分類		減容化手法					対象物			対象地			
					PDF_Link	URL_Link	減容化手法	吸着・移動	分級(乾)	洗浄(湿)	焼却	溶融	その他	土壌	植物等	廃棄物	1F外	1F内		
126	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射能土壌の高速除染処理システム—放射能粘土質土壌の除染処理と減容化技術— 放射能除染技術	原子炉事故, 放射性物質, セシウム同位体, 放射性同位体, 表層土, 蓄積, 土壌汚染, 減容, 噴流, 分離, 放射能除染, 吸着剤, パイロフィライト, 千枚岩, 懸濁液, 濾過装置, 回収, ラビディティ, 再利用, 水流, 震害	<a href="#">●</a>		●		●	●				●			●		
127			ほ	放射性物質と土壌汚染		<a href="#">●</a>									●				●	
128	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	ほ	放射性セシウム除染と戦略的農地資源保全	提案, 災害復旧, 大規模地震, 放射性物質, 除染, 農地資源	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●								●			●	
129	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性物質に汚染された土壌の除染・減容化技術	放射能汚染, 土壌汚染, 放射能除染, 減容, セシウム同位体, 土壌浄化	<a href="#">●</a>		●		●					●				●	
130	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射線防護 放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化技術	放射線防護, セシウム同位体, 放射性同位体, 土壌汚染, 汚染物質, 汚染防止, ヨウ素131, セシウム137, 除去, 浄化, 除去修復, 減容	<a href="#">●</a>		●		●					●				●	
131	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	ほ	放射性セシウム含有土壌への酸抽出方法の適用性に関する基礎的検討	radioactive caesium, acid extraction method, soil, stable caesium	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●					●				●	
132	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性物質汚染土壌等からの乾式Cs除去技術の開発	放射能除染, 熱処理, 土壌, セシウム同位体, 放射性同位体, 昇華	<a href="#">●</a>		●		●					●				●	
133	国立環境研究所		ほ	放射性物質を含む廃棄物の焼却処理		<a href="#">●</a>		●				●							●	●
134	国立環境研究所		ほ	放射性物質汚染廃棄物の適正処理に向けた課題		<a href="#">●</a>		●											●	●
135	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性物質汚染土壌等からの乾式Cs除去技術の開発	セシウム, 放射性物質汚染土壌, 浄化処理物, 高性能反応促進剤, 昇華, クリアランスレベル	<a href="#">●</a>		●		●					●				●	
136			ほ	放射性セシウム含有バイオマスの減容化に関する研究	放射性セシウム, バイオマス, バイオマスガス化発電, 減容化	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●				●				●			●	
137	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウムの土壌吸着反応における数値シミュレーション解析の進展	土壌化学特性, 吸着, セシウム同位体, 放射性同位体, 原子炉事故, シミュレーション, 粘土鉱物, 放射能除染, 土壌汚染	<a href="#">●</a>									●				●	
138			ほ	放射性物質を含む下水汚泥の減容化について—福島第一原発事故の影響への取り組み—		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●				●							●	●
139	土木学会	減容化	ほ	放射能汚染土壌の除染・減容化システムの開発	放射能汚染, 除染, 減容化, マイクロバブル, 高圧洗浄	<a href="#">●</a>		●		●					●				●	
140	産業技術	減容化	ほ	放射性セシウム含有土壌の土壌洗浄法の適用性評価試験	Radioactive Cesium, Soil washing, Contaminated Soil, Applicability test	<a href="#">●</a>		●		●					●				●	
141	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化システム—新しい洗浄技術による効率的な減容化と濃縮残渣処理の自動化による被曝線量の低減化—	原子炉事故, セシウム同位体, 放射性同位体, 土壌, 土壌浄化, 減容, 洗浄, 浄化, 処理, 自動化, 除去, 実証実験, 作業員, 被曝線量, 減少, 再生資源	<a href="#">●</a>		●		●					●				●	
142	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性物質を含む汚染土壌処理システム及び焼却灰洗浄減容化システム	放射性物質, 放射能汚染, 土壌, 減容, 洗浄, 放射性同位体, 気泡, サイクロン【分離】, 粘土, 除去, 濃度分布, 灰	<a href="#">●</a>		●		●					●			●	●	

通番	検索先	検索key	文献名	Keywords	文献		大分類		減容化手法				対象物			対象地		
					PDF_Link	URL_Link	減容化手法	吸着・移動	分級(乾)	洗浄(湿)	焼却	溶融	その他	土壌	植物等	廃棄物	1F外	1F内
143	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性物質に汚染された土壌の除染・減容化技術—第2報—	セシウム同位体, 放射性同位体, 原子炉事故, 放射能汚染, 放射能除染, 熱処理, 土壌, 土壌汚染, 減容, 放射性廃棄物	<a href="#">●</a>		●		●				●			●	
144			ほ	放射能汚染土砂の分級・減容化実証実験について		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●				●			●	
145			ほ	放射性セシウムを吸着し含水汚泥を減容化させる除染用土のうー岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業(平成25年度)実証試験結果報告—	道路側溝汚泥	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●					●	●			●	
146	土壌物理	放射性	ほ	放射性物質問題—土壌物理に求められること—	農地除染, 粘土科学, 凍土, 代かき, モニタリング	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>		●					●			●	
147	日本原子	放射, 汚染, 土壌	ほ	放射能汚染土壌の洗浄再生化技術 最新のセンシング/マニピュレーション融合化技術(2)		<a href="#">●</a>		●		●				●			●	
148	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性物質を含む汚染土壌等の洗浄と減容 バイオによる放射能除染への挑戦	セシウム同位体, 放射性同位体, 放射能除染, 放射性物質, 放射能汚染, 土壌汚染, 原子炉事故, 減容, 表層土, 気泡, 振動ふるい, 水洗, 灰	<a href="#">●</a>		●					●	●			●	
149			ほ	放射能汚染植物バイオマス減容化バイオ技術の開発		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●			●					●		●
150	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の減容化(その1:化学的除染)	土壌汚染, 放射能汚染, 減容, 放射能除染, 酸洗浄, 効果, 原子炉事故, 脂肪酸カルボン酸, ジカルボン酸	<a href="#">●</a>		●		●				●			●	
151	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の減容化(その2:表面剥離の試み)	原子炉事故, 放射能除染, 放射性廃棄物, 減容, 廃棄物減量化, 剥離, 性能	<a href="#">●</a>		●		●				●			●	
152			ほ	放射能汚染土砂の分級・減容化実証実験について		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●				●			●	
153	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウム含有土砂への土壌洗浄技術の事前適用性評価試験—道路維持管理に伴い発生した土砂の減容化に向けて—	放射性セシウム, 湿式分級, 減容化	<a href="#">●</a>		●		●				●			●	
154			ほ	放射性汚染物質の減容化に伴うセシウム排出挙動実証試験	低温熱分解, 炭化減容化, 放射性物質	<a href="#">●</a>		●		●				●			●	
155			ほ	放射性汚染物質の減容化に伴うセシウム排出挙動実証試験		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●				●			●	
156	土木学会	減容化	ほ	放射性物質の固定化・減容化同時処理技術の実証	放射性Cs, 減容化, 固定化	<a href="#">●</a>		●								●	●	
157	土木学会	減容化	ほ	放射性物質汚染土壌の小型簡易設備による減容化技術の開発	土壌洗浄, セシウム, 実汚染土, 除染, 減容化	<a href="#">●</a>		●		●				●			●	
158	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性Csの土壌粒度別分布傾向と分級による減容化への取り組み	発電所, 原子炉事故, 放射能汚染, 土壌汚染, セシウム同位体, 放射性同位体, 粒度分布, 分級, 減容	<a href="#">●</a>		●		●				●			●	
159	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の分級分析による減容化と農業用堰の受動的処理効果の検討	土壌汚染, 放射能汚染, セシウム同位体, 放射性同位体, 土壌, 除去, 浄化, 分級, 減容, 農業用水, 堰	<a href="#">●</a>		●		●				●			●	
160	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	ほ	放射性セシウム汚染土壌の減容化				●									●	●
161			ほ	放射性物質含有下水汚泥(指定廃棄物)の減容化実証事業(減容化処理の完了)中間報告		<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●									●	●
162	日本原子	洗浄	ほ	放射能汚染土壌洗浄処理における高濃縮汚染残土固形化処理性能評価	放射能汚染土壌, 核分裂生成物, 被ばく防護, 減容化, フィルタープレス	<a href="#">●</a>	<a href="#">●</a>	●		●				●			●	
163			ほ	放射性物質を含む作物残さ・雑草・枝葉等の安定・減容化技術	除染物, 減容化, ペレット, 成型処理, 固形燃料		<a href="#">●</a>	●								●	●	
164			ぼ	ボールミル法による土壌中からのセシウムの除去			<a href="#">●</a>	●						●			●	
165			よ	溶融塩法によるセシウムの土壌から水溶液中への抽出			<a href="#">●</a>	●				●		●			●	



放射性物質汚染土壌の減容化に関する情報収集・整理業務委託(文献一覧) (要約)

通番	検索先	検索key	文献名	要約
1	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	あ 亜臨界面水熱爆砕法による放射性廃棄物処理	亜臨界面水熱爆砕法による放射性廃棄物のセシウム(Cs)除去と廃棄物減容化を同時に行う日処理量公称5tの実規模プラントを作製した。このプラントで試験運転を行うことにより、指定廃棄物の中間処理用プラントとして十分な性能をもつことを実証した。非放射性Csを含む模擬土壌を使用し試験を行ったところ、80%以上のCs除去率、80%以上の減容化率を得ることに成功した。また反復処理することにより95%以上のCs除去率が得られることが実証された。本技術による放射性セシウム除去・減容化処理を行っても、放射性Csの再拡散の恐れはなく、プラントそのものが放射性汚染物質とならないことが示された。実証試験の結果に基づき、除去技術の有効性評価を国から委託されているJAEAから、本技術は「土壌に吸着したCsの除去効果が期待できる」という評価を得ている。(著者抄録)
2	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	あ 亜臨界面水熱爆砕法による放射性セシウム除去・減容化技術の開発	セシウム汚染模擬土壌を使用して、亜臨界面水熱爆砕処理実規模プラントを評価した。本プラントは、災害廃棄物の中間処理施設として十分な性能をもつことが明らかになった。
3	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	い 一般焼却飛灰からのセシウム溶出特性に関する研究	福島原発事故のために放出された放射性物質により汚染された土壌や海水、災害廃棄物などの除染が問題となっている。放射性セシウム濃度が8,000Bq/kg以下であれば、一般廃棄物最終処分場に埋立可能である。そのため焼却残渣からのセシウム溶出特性を把握し、より効率的にセシウムを回収することができれば、一般廃棄物として埋立可能となり、効果的に除染を行える。本研究では、放射性セシウムに汚染された災害廃棄物の焼却により発生する焼却残渣の減容化および除染の高効率化を目的とした。放射性セシウムを含んだ飛灰(6431Bq/kg)を対象に、大型遠心分離機を用いたセシウムの溶出特性の調査、溶出量試験(JISK0058-1)との比較、実験結果の妥当性の検討を行った。結果、溶出量試験に比べて遠心分離試験の方が高濃度のセシウム含有溶液を抽出できることが示唆された。また、今回の実験結果の妥当性を示すことができた。
4			い 飯館村蕨平地区における可燃性廃棄物減容化事業について(概要)	
5	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	い 飯館村における空気揚土攪拌式洗浄装置を用いたセシウム汚染土壌の減容化の実証試験	約100Lの小型でモバイルな空気揚土攪拌式の土壌洗浄装置によって、1バッチ当たり湿重量30kgまでの土壌を30分で処理し、セシウムが高濃度に付着した粘土・シルトを効率的に分離できることを飯館村の土壌を用いて実証した。ただし、土壌の種類によっては、その減容化の効率は高くない場合もあり、様々な性状の土壌を用いた更なる実証試験が必要である。
6	J-STAGE	セシウム, 吸着	い 茨城県南部土壌のセシウム吸着特性	茨城県南部土壌と代表的な粘土鉱物へのセシウム(Cs)の吸着と脱着の特徴を、安定同位体 <sup>133</sup> Csを用いて調べた。Cs濃度1mg/LのCsCl溶液約27mLを1.0gの土に添加すると、霞ヶ浦ヘドロは添加したCsの97%、黒ボク土表土は88%を吸着した。その後水で3回洗浄すると、黒ボク土表土の場合Cs吸着量は82%に、さらに1MKClで3回洗浄すると75%に低下した。用いたKの濃度が農地のそれより3桁高いことを考慮すると、施肥等による土壌からのCs溶出は少ないと考えられた。Cs初期濃度0.01~10mg/Lの範囲で分配係数(Kd)を比較した結果、黒ボク土、霞ヶ浦ヘドロのKdは、初期濃度が低くなるほど上昇した。実際の汚染土壌中の <sup>137</sup> Csの濃度はこれより数桁低いことから、放射性Csは今回の実験結果よりも強く土壌に吸着されていると考えられた。
7			い 飯館村蕨平地区における可燃性廃棄物減容化事業について—福島県全体の復興のために—	
8	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	え X線分光法と計算科学による土壌中セシウムの評価	福島第一原発の事故により放出されたセシウムの除染の効率化や除染に伴う廃棄物の減容化のため、土壌中のセシウムの状態を評価することは重要である。そこで、評価の予備検討としてX線分光法による測定を行うとともに、第一原理計算による解析を実施した。(著者抄録)
9	国会図書	—	お 汚染土壌からのセシウム溶離回収技術の開発(1)全体計画	環境の放出された放射性Csの除染方法について、有機酸を用いた除染方法を開発し、土壌からのCs溶離、回収、有機酸の後処理工程を含めた全体システムを検討した。本技術をベースとし、汚染土壌に対する可搬式の除染システムを構築、モバイル装置を製作し運転性能を評価した。
10	国会図書	—	お 汚染土壌からのセシウム溶離回収技術の開発(2)溶離試験	放射能に汚染された土壌の除染方法として、有機酸であるシュウ酸を用いたCs溶離回収技術を会アhつ下。シュウ酸溶液中に水田土壌を添加して常圧、100℃未満の条件で一定時間攪拌したCsの除去性能を評価した。水田土壌に対してCsを90%以上除去可能な条件を確立した。
11	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	お 汚染土壌対策 放射性Cs汚染土の浄化・減容化技術の開発—土壌分級・洗浄技術の適用—	原子力発電所の事故により膨大な量の汚染土と廃棄物が集積したため、放射性セシウム汚染土の浄化と減容化を目的として、表層土を用いて試験を行った。最初に基本性状試験(ロードカーブ試験)を行い、放射性セシウムは土粒子の小さい粘土・シルト分に偏在していることが分かった。この知見を基に、分級に加えてスクラビング・フローテーションを行い、平均除去率89%を達成した。一方、平均減容率は74%に留まった。
12	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	お 汚染された農地土壌からセシウムを99%除去—汚染土壌などの大幅な減容化に期待—	小型回転式昇華装置を用いた福島県飯館村での実証試験において、放射性セシウムの揮発を促進する熱処理条件を明らかにし、複数の高性能反応促進剤の添加により、福島県内の農地土壌(60,000Bq/kgレベル)から、土工資材などに利用可能なレベル(100Bq/kg以下)まで放射性セシウムを分離除去(99%以上)し、その含有量を低下させることに成功した。本成果を用いることで、放射性セシウムに汚染された土壌の削り取りなど、除染によって発生した廃棄物土壌などの大幅な減容化が可能であり、除染および廃棄物処理の現場での活用が期待される。(著者抄録)
13			お オゾンを用いた排ガス処理装置付輻射熱熱分解炉による有機物等減容化技術—岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業(平成25年度)実証試験結果報告—	稲わら、牧草及びしいたけ廃ぼだ木等を対象に輻射熱熱分解炉と排ガス処理装置を組み合わせた装置を用いて、有機物を熱分解により灰化し、減容化する。
14	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	お 汚染土壌の貯蔵負荷低減のためのセシウム溶出回収処理(3)セシウム溶出回収処理後の線量低減化の計算	汚染土壌を中間貯蔵する際の管理環境における放射線量の低減を目的として、セシウム溶出回収処理により廃棄物の減容化を図るとともに、処理後の放射性セシウムを含む沈殿物を、放射能濃度を低下させた土壌を活用して遮蔽する方法により、中間貯蔵施設全体の空間線量率の低減化を可能とする条件を検討した。(著者抄録)
15	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	お 汚染土壌からの放射性セシウムの除去・回収	放射性物質に汚染された土壌から、その主たる原因物質である放射性セシウムを除去・回収するプロセスとして、集落や農地単位で実行可能な小規模分散型プロセスを提唱し開発した。このプロセスは、低環境負荷な方法で汚染土壌から放射性セシウムを脱離・抽出すること、および新開発のセシウム吸着材を用いて脱離・抽出したセシウムを回収することから成る。1バッチ当り100~200kgの汚染土壌を扱えるプロトタイプ試験装置を設計・試作し、福島県飯館村の実汚染水田土壌を用いて試験を行ったところ、除染率は90%程度に達した。
16	GiNii	減容化	お 汚染水浄化, 汚染土壌減容化のキーテクノロジーは固液分離技術(小特集 粒子・流体プロセス部会の最新動向と活動報告: 震災復興への粒子・流体プロセス工学的アプローチ)	
17			か 画期的なセシウム吸着剤を開発	
18	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	か 界面化学的分散制御高せん断解砕による放射能汚染土壌洗浄 福島県における汚染土壌洗浄処理フィールド試験(第1報)	福島県双葉郡浪江町小学校津島校庭の高レベル汚染土壌の洗浄再生技術を確認するため、界面制御による高せん断解砕洗浄実験を実施し、その洗浄効果並びに減容濃縮化効果の検証を行うとともに汚染土壌の洗浄・減容化の実用処理プラント構築のための要素技術としてそれぞれ分散・分離・洗浄・濃縮システムを設計するためのプロセス工学データを取得した。(1)高トルク型ブランジャー装置を用いた洗砕洗浄を実施した結果、粒径0.5mm以上の原土において顕著な洗浄効果が認められ、さらにビーズ投入による洗浄率の向上が認められた。(2)洗浄時間と洗浄率との関係において粗大土壌粒子表面に固着している親和性の強い汚染粒子と微細粒子の洗浄乖離に起因した二つの洗浄プロセスがあることが明らかとなった。(3)0.5mm以下の原土における解砕洗浄では、粒子の微細均整化が進むとともに0.510mの微細粒径群において主要なFP汚染源の集積化が認められこれらFP汚染源の選択的除去は分級技術を応用することで可能である。

通番	検索先	検索key	文献名	要約
19	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	か 環境汚染と除染 住民への理解と廃棄物の減容化が課題	福島原発事故により、多量の放射性ヨウ素、セシウムが環境に放出され、福島県を主として東日本に広く放射性物質による汚染が広がった。平成24年1月1日に、除染や放射性物質で汚染された廃棄物の取扱いに関する制度や基準が制定され、平成24年第一四半期から宅地の本格的な除染が開始されている。放射性セシウムは表面層の土壌粒子に付着しているため、大きな低減効果を得るためには、表面土壌の剥ぎ取りが有効であるが、除染により汚染土壌や草木などの有機系の廃棄物が、極めて多量に発生している。廃棄物の中間貯蔵施設への搬入を考慮すると、減容比は近い将来重要な課題となるため、土壌から放射性セシウムを洗浄などによって分離除去する技術の開発が必要である。また除染を進めるにあたって、汚染物の保管場所の確保が極めて重要であり、住民の理解が不可欠であり、住民も参加して決めていくことが有効である。更に、1mSv以下を達成するために森林全ても除染することは困難であり、むしろ森林生態圏の保全という観点から、除染を考えることが必要である。
20	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	か カチオン種の異なる各種ゼオライトによるセシウムイオンの回収と固定化	福島第一原子力発電所の事故により、環境中に放出された放射性セシウムは多くの生態系に深刻な影響をもたらしている。この放射性セシウムの回収及び固定化材としてゼオライトが注目されている。我々はイオン交換法によって様々なカチオン種を含む各種ゼオライトを作製した。本研究では、これらのゼオライトのセシウムイオン吸着挙動及び、800℃～1200℃で焼成後のゼオライトからの溶出挙動を純水と0.6M塩化ナトリウム水溶液中で検討した。
21	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	か 乾式Cs除去技術で生成する浄化処理物の各種土工資材評価	放射性セシウムで汚染された廃棄物・土壌を熱処理して、放射性セシウムを除去する技術（乾式Cs除去技術）の開発を行なっている。平成24年度は熱処理により浄化された生成物（浄化処理物と称す）の各種土工資材としての適用性を評価することを目的に、実規模レベルの設備を用いて浄化処理物を製造し、品質評価を行なった。出発原料として粘土粉末（非汚染）および下水汚泥の利用を想定し、粘土にリン・鉄・クロムを添加したものを用いた。これに高性能反応促進剤を添加し、放射性セシウム濃度を確実にクリアランスレベル（100Bq/kg）以下にできる条件で浄化処理物を製造した。得られた浄化処理物の品質評価試験を行なった結果、重金属溶出量は基準値を満足し、かつ盛土・路盤材・コンクリート骨材としての各種基準にすべて合致し、土工資材として使用できることを実証できた。
22			か 家畜ふん堆肥に含まれる放射線セシウムについて	
23	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	か 革新的環境浄化技術の開発 ナノカルシウム鉄による放射性セシウム汚染土壌の乾式除染技術	金属カルシウムと酸化カルシウムからなるナノサイズの複合体(ナノカルシウム, nCa)を用いると、乾式処理であるにもかかわらず土壌中の重金属類の不溶化処理に有効であることを見出し、さらに、ナノ粒子調製時に鉄粉を加えることで乾式磁選の追加機能を付与した複合体(ナノカルシウム鉄:Fe-nCa)の開発に成功した。これらのコア技術は、土壌表面に磁性鉄を含有する一定厚の被膜形成を促すことが可能である。従って、土壌粒子径、鉄粉濃度、および分離用の磁石強度を調整することで、比表面積が大きく単位重量当たりに吸着している放射性Cs量が多いとされる一定サイズ以下の土壌を迅速に分離することが可能となる。本技術は仮置き場から中間貯蔵施設へ、あるいは、中間貯蔵施設から最終処分場へ向かう回収済みの汚染土壌の迅速減容化技術として期待される。そこで本報告では、Fe-nCaの物性や乾式除染原理を解説し、Fe-nCaによる実汚染土壌の除染の取り組みについて紹介した。実験方法、Fe-nCaの調製法と実汚染土壌処理、ベンチスケール機による実証、Fe-nCaによる除染原理、実汚染土壌の処理、迅速除染技術への高度化、除染率向上の試みなどについて解説した。
24	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	き 期待高まる除染技術実証事業 環境省「除染技術実証事業」の概要	福島第一原子力発電所事故に伴って放出された放射性物質による環境汚染に対処するための特別措置法が制定され、環境省「除染技術実証事業」が進められている。事業実施状況と技術概要は次の通りである：(1)路面・建物など：高圧水洗浄、研磨・剥離、特殊水洗浄などについて試験を行い、吸引式の超高圧水・高圧水洗浄では除染効果の無かった、密粒アスファルト、透水性舗装、インターロッキング、コンクリートブロックなどでも高い除染効果を得ることができた。(2)土壌：土壌中に強く固定されているセシウムを除染する際、粒度の大きなものの表面を摩粉などにより削ることで、除染効果を高めることができた。そのほか、反応促進剤を加えて加熱し、セシウムを昇華させる手法や、酸を用いて土壌を溶解させ、セシウムを遊離させる手法も試験した。(3)水処理：ゼオライトやフェロシアン化鉄といったセシウム吸着剤を活用した実験を実施した。(4)有機物：熱分解や堆肥化といった手法について試験を行い、セシウムの挙動に関する知見を得ることができた。そのほか、樹皮の洗浄試験、瓦礫の洗浄、焼却灰の減容化などの試験も行った。
25			き 基礎物性・挙動解析プロジェクト報告	
26	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	く 草木類を含む土壌の溶融処理試験	福島第一原発から環境に拡散した放射性物質の除染事業が本格化しようとしている。今後の課題は中間貯蔵をみずえた除染物の減容化処理であり、そのための技術開発が各所で実施されている。本研究は拡散した放射性セシウムを熱化学的な処理、溶融処理での揮散分離を試みたものである。試料として草木類を含む土壌を選定した。放射性セシウムは広範囲に拡散したが、その大部分は農用地と山林であり、生活環境に影響ない程度までの除染がこれから必要と思われる。山林や農地の表土には必ず草木類が混入し、山林においてはその含有率は20%以上にも及ぶ。これらを想定して大型テストプラントによる溶融実験を実施し、その成果として腐葉土20%混合、安定セシウム含有率3500ppmの模擬土壌にCaCl240%、融点調整剤（消石灰）15%を添加し、1350℃での雰囲気のもと99.4%のセシウム揮散率を得ている。
27			く 空気揚土攪拌式洗浄装置を用いた放射性セシウム汚染土壌の減容化方法の開発	
28	J-STAGE	—	げ 現地土壌におけるセシウム固定 復興農学が目指すもの—東日本大震災からの復興への貢献と課題—	
29	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	こ 高温加熱処理による高濃縮汚染残土の高減容化に関する研究 福島県における汚染土壌洗浄処理フィールド試験（第4報）	福島県下で18,000Bq/kgを越える高放射能汚染土の界面化学的分散制御と高速せん断流解砕による洗浄フィールド試験を実施し際に発生した高濃度汚染残土中のCs等FPを、その主要捕獲鉱物であるモルデナイト鉱物相の高温場における構造不安定性を利用して再回収する技術に関する検討を行い、下記結論を得た。(1)代表的な東北産の天然モルデナイト鉱物のCs-型での高温構造不安定性は1173K以上で顕著である。(2)高濃度汚染残土の1173K1時間までの高温加熱試験によりこの鉱物相からのCsの乖離を観測した。その際のFP乖離量は、高温加熱初期において顕著であり、1時間加熱後において初期値の約65%程度が乖離したものと評価された。(3)高濃度汚染残土の高温処理により発生するCsガス的高温再回収は、電気集塵式高温FPフィルターと後段でのコールドトラップにより発生ガスのほぼ100%の回収が可能である。
30	J-STAGE	放射性, 土壌, 減容化	こ 高放射能汚染土壌の界面化学的分散制御高速せん断流解砕洗浄による再生土化	最高570,000 Bq/kgを超える高放射能汚染土壌の校庭土、原野土ならびに側道脇土の界面化学的分散制御と高速せん断流解砕による土壌洗浄実験を行い、土壌特性に関する洗浄・濃縮・減容化効果について下記結論を得た。(1)3種類の原土壌に対して30 min間程度の解砕洗浄を行うことにより60-95%の洗浄率が期待できる。(2)解砕洗浄後の再生土(8,000 Bq/kg以下)の回収率は3種類原土壌において60-82 wt%であり、特に、原野土において500 Bq/kg×33 wt%の低線量化での回収を達成した。(3)高濃縮土の固化による汚染土壌の減容化(最高260,000 Bq/kg)において60-85 wt%を達成した。(4)本解砕洗浄技術により汚染土壌に含まれる全FP量の90%以上のものが濃縮ケーキとして回収可能である。(5)高放射能汚染土壌の主要FP捕獲鉱物相は校庭土においては金雲母等の層状ケイ酸塩類鉱物であり、原野土や側道脇土においてはモルデナイトである。
31	環境放射	—	こ 湖沼底泥の湿式触媒酸化法による減容化と除染効果	除染においては、1)セシウムを高濃度に含むものの分離、2)それを処理し減量とセシウム濃度低下を図る、という2つの重要な目標がある。この研究では、ため池底泥を主な対象として、次亜塩素酸を金属セラミックスに接触・発生させた活性酸素水をため池底泥に与えることによって、ため池底泥の酸化分解による減容化とセシウム濃度の低下を図る技術の効果を示すデータを報告する。ため池底泥、落ち葉を含むため池底泥、落ち葉を燃やした焼却灰の3種類のサンプルにおいて、減容化される際に、セシウムが水へと洗い出される効果が高いことが示唆された。

通番	検索先	検索key	文献名	要約
32	J-STAGE	放射性、 土壌、減 容化	こ 耕起した放射能汚染水田を除去するための濁水回収システムを組み込んだ水による土壌攪拌工法の開発	耕起した放射能汚染水田土壌を除去するために、濁水回収システムを組み込んだ土壌攪拌工法を開発した。濁水回収システムは、トラクター後方に設置した3列ノズルと真空バキューマからなる。パイロットスケールで、代かき除染回数への影響試験1（サクシオンホース長：50m）と30a圃場への適用性試験2（180m）を行った。試験1では、代かき2回目まで土壌の放射性Cs濃度は急激に低下したが、それ以後の濃度低下は低調であった。希釈効果を考慮した除染率は35～40%/9回代かきで、放射性Cs濃度の濃縮率は最大で2.6倍である。試験2の除染率は約15%/4回で、濃縮率は1.7倍である。試験2の低い除染率と濃縮率の原因は、サクシオンホース長が試験1より長いことによる吸引力の低下である。本システムを現地適用するには、ノズル先端で細粒土の回収率を更に高くするとともに、濁水回収量を増加させ、放射性Csの濃縮率を向上させる必要がある。
33	J-STAGE	放射性、 土壌、減 容化	こ 高放射能汚染土壌洗浄システムにおける水循環システムの性能評価	新たに試作した放射能汚染水処理用凝縮・濃縮装置試作機（蒸発量40 kg/h）を土壌洗浄システムに組み込み、放射能線土壌洗浄フィールド試験を福島県内で実施し、本試作機の汚染土壌洗浄水の蒸発蒸留による再生・濃縮性能に関する評価を実施し、下記結論を得た。（1）本試作装置により解砕洗浄水から生産される凝縮水は放射性核種や不純物の混入の極めて少ない蒸留水であり、洗浄水原液の86-88%程度を再生循環水として解砕洗浄工程に供給できる性能を有している。（2）一方、同時に生産される12-14%の濃縮液には解砕洗浄液中の77-100%のFPならびに不純物が含まれている。
34	J-STAGE	減容、放 射性	さ 産業用ゴミ焼却炉を用いた放射性セシウム汚染土壌の減容除染システムの検討	既に産業用大規模焼却炉で放射性セシウムについて約千分の一の減容と約78%の分離除染を得ている。同様の方法による産業用ゴミ焼却炉を用いた放射性セシウムに汚染された土壌等の減容除染システムの検討を行ったので報告する。
35	JDream	土壌、減 容化、放 射性セシ ウム	さ 最新の土壌・地下水汚染浄化技術 放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化システムの開発 効率的な浄化・減容化と作業員の被曝線量の大幅な低減を可能とした新しい洗浄技術の実用化	放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化技術は過去に存在しなく、新しく洗浄技術の開発を試みた。一般的な土壌洗浄技術を応用し放射性Csの除去ならびに減容を目指すとともに、作業員における被曝線量の低減を課題とした。洗浄処理フロー、濃縮残渣処理の自動化システムを考案し、実際に～26270Bq/kgの汚染土壌試料を用いて土壌洗浄の実証実験を行った。その結果、全ケースにおいて土壌洗浄後に3000Bq/kg以下になり、再生資材として利用可能であることを確認した。また、濃縮残渣処理の自動化によって従業員の被曝線量が3585 μSv/年、低減率86%にまで減少できることを確認できた。
36	JDream	土壌、減 容化、放 射性セシ ウム	ざ 雑草繁茂域における植物体および表層土の効率的な除染および減容化方法	
37	J-STAGE	放射性、 土壌、減 容化	し 湿式分級洗浄および天然鉱物等による農地土壌等に含まれる放射性セシウム除去方法の実践的検討	放射性セシウムで汚染された土壌の減容化を検討するために、福島県飯館村の農地土壌やグラウンド土壌に対し土壌分級洗浄実験を行った。その結果、水田、畑の土壌については分級洗浄により放射性セシウムの7,8割を0.075mm以下の濁水として回収できること、また、グラウンドの砂質土壌については粗粒画分にも有意な量が分布しているが、分級洗浄の前に分散、振動、研磨などの処理を行うことにより、放射性セシウムをより細かい画分より回収できることを明らかにした。
38	J-STAGE	放射性、 減容	し 焼却施設における廃棄物減容化と放射性セシウムの挙動	東北地方の灰溶融炉付ストーカ式焼却炉と関東地方の流動床式ガス化溶融炉において、放射性Csを含む廃棄物の焼却特性及び放射性Csの挙動を調査した。得られた結果は、放射性Csの移行・濃縮に対し、焼却飛灰と溶融飛灰ではClが、焼却主灰とスラグではSiが大きく影響すること、方式が異なる焼却・溶融両プロセスにおいて、塩基度（CaO/SiO <sub>2</sub> 比）を指標とすることで放射性Cs挙動の統一的把握に有効であること、放射性Csは主灰、スラグよりも飛灰、溶融飛灰への移行が、減容化に効果的であること、バグフィルターの温度を下げることで、捕集飛灰の粒径が大きくなる傾向を示し、飛灰捕捉効果向上が期待できることであった。
39	J-STAGE	放射性、 土壌、減 容化	じ 除染へ挑戦する建設土木技術	
40	J-STAGE	放射性、 土壌、減 容化	じ 地盤環境中の放射性物質の挙動 〈特集〉汚染土壌・廃棄物等の処理	本稿では原発事故による放出された放射性核種のうち、131I, 134Cs, 137Csによる地盤環境汚染に焦点を当て、地表面における沈着量や空間線量の地理的な分布、沈着した放射性物質の地盤中での挙動、作物への影響について概説する。
41	J-STAGE	放射性、 土壌、減 容化	じ 除染作業により除去された土壌等の除去物の仮置場の設計・建設および維持・管理	Since the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident caused by the Tohoku Region Pacific Coast Earthquake on March 11, 2011, decontamination work has been conducted in the surrounding environment within the Fukushima prefecture. Removed contaminants including soil, grass and trees are to be stored safely at temporary storage facilities for up to three years, after which they will be transferred to a planned interim storage facility. The decontamination pilot project was carried out in both the restricted and planned evacuation areas in order to assess decontamination methods and demonstrate measures for radiation protection of workers. Fourteen temporary storage facilities of different technical specifications were designed and constructed under various topographic conditions and land use. In order to support the design, construction and monitoring of temporary storage facilities for removed contaminants during the full-scale decontamination within the prefecture of Fukushima, technical know-how obtained during the decontamination pilot project has been identified and summarized in this paper.
42	JDream	土壌、減 容化、放 射性セシ ウム	じ ジオマテリアルを利用した除染	東京電力福島第一原子力発電所内の高放射能汚染水や原発周辺および広域に汚染が拡大している環境水、土壌等を中心に、汚染の現状と様々な化学組成・構造・機能を有する天然鉱物「ジオマテリアル」を用いた放射性物質を除去・回収への取り組みとその課題について紹介した。モルデナイトやクリノプチロライトのようなゼオライト、粘土鉱物を選択的吸着剤を用いた高放射能汚染水の処理システムの課題、原発周辺および広域での環境水、土壌の汚染の状況を述べた。フォールアウトした放射性Csの固着剤として粘土鉱物を用いた。汚染土壌の除染の課題は廃棄物の処分・減容化である。
43	環境放射	ー	じ 磁化Na-P1 型ゼオライトによる土壌Csの除去技術の開発	Csと同じ大きさの結晶孔隙をもつNa-P1型ゼオライトがCsの特異選択吸着特性を有することに着目、これを磁性化し磁化Na-P1型ゼオライトとし、土壌よりCsを取り除く実証実験を福島で実施した。土壌に1割の磁化Na-P1型ゼオライトを混入し、10分間のミキシングを1回行ない、3段階程度の磁選操作により概ね8割以上のCsが土壌より取り除かれることが判明した。成否の決め手は、ミキシングによりマグネタイトが分離しない磁化Na-P1型ゼオライトの作りこみ、土壌から磁化Na-P1型ゼオライトを分離する磁選機の構造、溶出助剤として2%のシュウ酸ないしシュウ酸アンモニウム条件だった。
44	土木学会	放射性	じ 除染除去土壌に対する分級時の洗浄技術の適用性検討	放射性物質を多く含む細粒分を土壌から除去（分級）することにより、汚染土壌の減容化を目指す工法が各所で検討されている。除染除去土壌の分級による減容化の実施時に土壌から細粒分を分離除去する効果が高い洗浄方法として、「高圧水の水中噴射によるキャビテーションジェット洗浄」、「超音波洗浄」の2方法を抽出し、小規模モデル実験設備を使用して実際の除染除去土壌に対して分級洗浄を実施した。分級洗浄後の粗粒分について
45	J-STAGE	放射性、 土壌、減 容化	じ 除染可燃物焼却灰（飛灰・主灰）の減容固化技術の開発	除染作業で収集された草本類等の可燃物は、焼却により減容・無機化することが有効である。ただし、焼却により発生する焼却灰（飛灰・主灰）には、放射性セシウムが高濃度に濃縮されるため、より安全な取扱いが求められる。この高濃度に汚染された焼却灰に、少量の水、固化材を添加し、高周波の外部振動で密実に固化する特殊技術「超流体工法」を適用した。その結果、①汚染焼却残渣を容積で概ね30%減容できること、②所定の強度を有する固化体を製造でき十数段の積上げ保管が可能になること、③遮水性に優れる固化体が得られること等が分かった。また、実証工事を実施し、同技術で実物大の模擬固化体を製造できることも確認した。汚染焼却灰に同技術を適用することにより、中間貯蔵施設や最終処分施設の限られた空間を有効に利用することが可能になる。
46			じ 除染廃棄物の減容（2.6） 福島第一原子力発電所事故に係るサイト外緊急時対応の調査及び環境修復活動の検討に関する報告	

通番	検索先	検索key	文献名	要約
47			じ 磁気分離による汚染土壌の減容化の試み	
48	日本原子	洗浄	じ 除染技術選定・評価等業務報告書（平成24年度）－環境省平成24年度除染技術実証事業（受託研究）－	除染作業に利用できる技術について民間企業から技術提案を受け、その除染効果を経済性、安全性等とともに検証する「除染技術実証試験事業」を環境省からの委託を受けて実施した。原子力機構は、焼却灰の洗浄やため池浚渫等の15件の技術を採用し、実証試験への助言及び評価を実施した。
49	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	じ 除染技術～物理分離・分級と土壌添加による低温加熱の有効性 粉体技術のイノベーション	本稿ではまず、東電福島第1原発事故で放散した大量の放射性物質は広大な地域を汚染している状況の中、汚染地の復興に貢献するための日本原子力学会の取り組みとさまざまな除染技術の提案、環境修復に貢献する粉体処理・単位操作の有効性を述べた。次いで国（環境省）の除染事業と斬新な除染技術と吸着材の開発の現状を紹介した。その上で、粉碎と600℃程度での低温加熱による汚染バイオマスの減容化と放射性Csの安全な固定化法を紹介し、具体的な成果として、稲わらの重量減少が炭化処理では約(1/3)、燃焼では、約(1/7)となること、また、原料の放射能濃度は5,000～6,000Bq/kgであるが、炭化では約3倍、燃焼では約7倍に上昇することを示した。本稿では、日本原子力学会の除染技術、環境省の実証事業と選択試験による除染技術、斬新な除染技術の紹介、粉碎と低温加熱による放射性Cs汚染バイオマスの減容化と安定化などについて解説した。
50	環境放射	－	じ 事故由来放射性物質汚染廃棄物の熱処理に関するこれまでの研究成果	事故由来放射性物質に汚染された廃棄物の焼却もしくは溶融等の熱処理に関する研究課題に対して、原子力発電施設の爆発事故以降の国内学会発表を中心に、調査結果および研究成果を収集し、これまでの知見を整理した。都市ごみから除染廃棄物相当の汚染バイオマスまで処理対象範囲を幅広くすることを意識しつつ、放射性物質の挙動の違いやその制御性および施設の維持管理の観点から知見を考察した。さらに、過去の内外の文献から示唆に富む研究成果を紹介するとともに、これまでの知見と比較しながら、今後解明すべき課題も提示した。
51	地盤工学	減容化	じ 除染除去土壌に対する超音波洗浄装置の適用性検討	
52	J-STAGE	－	じ 除染技術の高度化－セシウムの濃縮分離（放射性物質で汚染された土壌からの熱処理によるセシウム除去）復興農学が目指すもの－東日本大震災からの復興への貢献と課題－	
53	J-STAGE	減容	じ 除染廃土の湿式減容技術 復興農学が目指すもの－東日本大震災からの復興への貢献と課題－	
54	日本原子	洗浄	じ 除染技術選定・評価等業務報告書（平成25年度）－環境省平成25年度除染技術実証事業（受託研究）－	除染作業に利用できる技術について民間企業等から技術提案を受け、その除染効果を経済性、安全性等とともに検証する「除染技術実証事業」を環境省からの受託を受けて実施した。平成25年度の除染技術実証事業では、土壌や緑地、廃棄物の除染や、焼却灰の洗浄等の11件の技術が採択され、原子力機構は実証試験への助言及び評価を実施した。
55	国会図書	放射性物質	す スクラビング・フローテーションを用いた土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の効率的な浄化と減容化	福島県内の校庭と運動場の表層土壌を用いて、スクラビング・フローテーションを強化した土壌洗浄法による浄化と減容化に関する実験的な検討を行った。放射性Csは、砂～細砂分よりも土壌粒子径が小さく比表面積が大きい粘土・シルトに偏っていた。分級処理（2段湿式フルイ＋サイクロン）のみによる除去率は試験によってバラツキが大きく66～87%であった。分級処理に加えて化学的な洗浄処理（スクラビング・フローテーション）を行った場合の除去率は試験間のバラツキが小さく90～96%であった。放射性物質汚染土壌についてもスクラビング・フローテーションを行うことで安定して90%以上の高い除去率が得られることが確認された。
56	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	す 水稲栽培試験田における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (2) 水稲栽培試験田におけるセシウムの挙動評価	福島原発事故により汚染した南相馬市の水田にて試験的に水稲栽培を実施した。試験ではゼオライト散布の有無、カリウム施肥の有無をパラメータとした試験田を準備した。水稲栽培を実施し、収穫した玄米へのセシウムの移行について、ゼオライト散布、カリウム施肥の影響評価を行った。
57	CiNii	放射性セシウム	す 水稲栽培試験田における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究：(1) 試験計画および現地概要	福島原発事故により汚染した福島県内の水稲栽培試験田にて、土壌や流水などの汚染状況の把握やゼオライトの散布および施肥の違いによるセシウムの移行について、試験概要を述べる。
58	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	す 水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (1) 全体計画と現地の概要	福島原発事故により汚染した南相馬市の水田にて土壌や流水等の汚染状況の把握や、荒掻き、代掻き等の水耕作業を行い、放射性セシウムの挙動を評価して、水田における放射性セシウムの除染について検討した。ここでは放射線測定と汚染状況の評価について述べる。
59	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	す 水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (2) 放射線測定と汚染状況の評価	福島原発事故により汚染した南相馬市の水田にて土壌や流水等の汚染状況の把握や、荒掻き、代掻き等の水耕作業を行い、放射性セシウムの挙動を評価して、水田における放射性セシウムの除染について検討した。ここでは放射線測定と汚染状況の評価について述べる。
60	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	す 水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 (3) 荒掻き作業と除染効果の評価	福島原発事故により汚染した南相馬市の水田にて土壌や流水等の汚染状況の把握や、荒掻き、代掻き等の水耕作業を行い、放射性セシウムの挙動を評価して、水田における放射性セシウムの除染について検討した。ここでは放射線測定と汚染状況の評価について述べる。
61			せ 洗浄・水処理プロジェクト報告	
62	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ち 超電導磁石を用いたセシウム汚染土壌の除染に向けた土壌の磁気分離に関する研究	東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故により放射性セシウムが広範囲に拡散した。この放射性セシウムで汚染された土壌の減容化を目的に、高速大量処理を可能とする超電導磁石を用いた磁気分離法の適用の可能性について検討した。分級後のモデル土壌に超電導磁石による高勾配磁気分離を施し、セシウムを強く吸着し、かつ磁化率の比較的高い2:1型の粘土鉱物の選択的な分離を行った。特に本研究では、選択的な磁気分離の効果を評価するために、X線回折法を利用して、磁気分離前後の土壌の定性・定量分析を実施し、各粘土鉱物の分離率を調査した。その結果をもとに、高い除染率、減容化率の得られる分離条件について検討した。（著者抄録）
63	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ち 超電導磁石を用いた高勾配磁気分離によるCs汚染土壌の減容化	筆者らは、放射性物質のセシウムを高速大量処理が可能である超電導磁石を用いた磁気分離法を除染に適用することを試みている。本論文では、土壌中にセシウムが強固に付着した2:1型粘土鉱物を分離するため、大量高速処理が可能である超電導磁石を用いた磁気分離を土壌分離に適用した。2:1型粘土鉱物であるパーミキュライトと1:1型粘土鉱物であるカオリナイトを同量混合した模擬土壌を、磁化率の違いを利用し、超電導磁石を用いた高勾配磁気分離法を施した。分離後の土壌にXRD解析を行うことで、その分離率を算出し、高い分離率を得た。さらに、実汚染土壌を用いて同様の磁気分離を施し、フィルター捕捉分および通過分の土壌の放射線量を測定することで、実際の土壌への超電導磁石を用いた磁気分離の適用の可能性が示された。
64	土木学会	放射性セシウム	つ 土の粒度分布に注目した放射性物質吸着土壌の減容化に関する検討	2011年3月11日に発生した、東日本大震災により、関東地方から東北地方にかけて、直接的・間接的に各地で様々な被害があった。その被害の中でも、東京電力福島第一原子力発電所の事故によって、福島県を中心に関東圏域等に及ぶ広い地域で放射性物質が拡散し、土壌汚染が生じており、早期に解決すべき問題と位置づけられている。そこで、本研究では放射性セシウムで汚染された土の中で、汚染されている割合が大きい部分を特定し、分級操作を行うことにより、汚染土を減容化する方法を確立することである。そのため、土粒子の粒度分布に着目し、イオン吸着実験を行うことで、放射性物質吸着土壌の減容化に関する検討を行う

通番	検索先	検索key	文献名	要約
65	CiNii	セシウム、吸着	て 天然鉱物によるセシウムの吸着に関するデータベースの一例	(独)物質・材料研究機構データベース(MatNavi)のデータのうち著者らが測定し取りまとめた天然鉱物のCs吸着データをグラフ化して全体的な傾向を明確にし、各鉱物の吸着特性と今後の課題について述べた。
66	地盤工学	セシウム	で 電気泳動法を利用したカオリン粘土に含有するセシウムの除去に関する実験・解析	
67			と 特殊ジオテキスタイル製袋を活用した水路底質等の脱水減容化—岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業(平成24年度)実証試験結果報告—	バキューム車による吸引により除去した土壌、底質を透水性であり長期耐久性を有する特殊ジオテキスタイル製袋に充填し、土壌等に吸着した放射性セシウムを袋内にとどめ、脱水させることで減容化する。
68	日本原子	放射性セシウム	ど 土壌の原位置加熱による放射性セシウムの除去可能性の検討	福島第一原子力発電所の事故に伴い放射性核種によって広範囲の土壌が汚染され、さまざまな環境修復策が検討されている。セシウム(Cs)の揮発性を利用した原位置土壌加熱によるCs除去方法の有効性を確認するため、バーナーを用いた土壌加熱による土壌温度の上昇確認、加熱時の放射性Csの揮発挙動を調べた。草焼バーナーで土壌表面をCs化合物の融点まで加熱するには15分以上の加熱が必要であり、最大温度は700Cであった。また、土壌表面が約600Cまで加熱されても表面から1cmの深さでは約300Cまでしか上昇せず、5cmの深さでは5060C程度であった。600C1300C及び5分60分とした加熱試験の結果、Cs-134並びにCs-137の加熱前後の放射線量変化率は-9.8%+14.0%の範囲でばらついている程度であり、顕著な揮発挙動は見られなかった。放射性Csの化学形態と揮発挙動を検討するため、CsCO試薬を土壌又は模擬土壌のモルデナイト型ゼオライトと混合させたものについて、TG/DTA分析等を実施した。結論として、放射性CsがCsCO単体で存在した場合、加熱によって揮発除去できるが、SiOとAlOが共存した場合、加熱によってCsAlSiO等の化合物が生成され、放射性Csは土壌中に留まると推定される。
69	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	ど 土壌からのセシウムの分離	
70	日本原子	減容化	ど 土壌へのセシウム吸着機構: 第一原理計算による白雲母のほつれたエッジサイトへの放射性セシウム吸着研究	2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う、東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された放射性セシウムは、半減期が長い(Csは約30年)うえに土壌に吸着して離れない性質を持つため、住民避難の主な原因となっている。住民の帰還を目指して除染が行われているが、除染によって発生する除去土壌の処分が問題となっている。そこで、土壌から放射性セシウムを脱離して処分土壌を減容する技術の開発が望まれるが、効率的かつ経済的な減容化の方法は未だ開発されていない。その理由の一つは、土壌への放射性セシウム吸着機構が明らかになっていないことである。われわれは、放射性セシウムが土壌に吸着して離れない原因となっている、放射性セシウムを選択的かつ不可逆的に吸着する雲母類粘土鉱物の特殊な吸着サイト(FrayedEdgeSite)をモデル化し、第一原理計算を実行した。その結果、風化により層間間隔が開くFrayedEdgeSiteの層間がセシウムイオンのイオン半径と適合する場合に、セシウムとカリウム(既に粘土鉱物に含まれている)の交換が起こり得ることを世界で初めて明らかにした。
71	環境放射	—	ど 土壌からのCs除去を目的とした磁化Na-P1型ゼオライトの合成	石炭灰を原料とするNa-P1型ゼオライトの反応時間やNaOH濃度について研究した。また、NaAlO2を添加してSi/Al比を減ずることによりCEC性能を高めることが可能である。新しい、磁化Na-P1型ゼオライトを石炭灰と鉄塩化物を原料としたアルカリ処理により得ることができた。これにより放射性セシウムを吸着させた後に磁選回収が可能となる。TEM観察により、ゼオライト粒子中にマグネタイトナノ微粒子が分散していることを確認した。磁化Na-P1型ゼオライトを用いた土壌の除染試験により本材料は除染能力を有していることが確認できた。
72	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ど 土壌洗浄を用いた放射性Cs汚染土壌の減容化と濃縮残渣処理の自動化について	
73	CiNii	—	ど 土壌中の放射性セシウムの安定性に関する研究(A20)	
74	環境放射	—	ど 土壌洗浄法による放射性物質汚染土壌の浄化・減容化および濃縮残渣処理の自動化	土壌洗浄法による放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化および濃縮残渣処理の自動化に関して、パイロットプラント規模の実証試験を行なった。実証試験は、(a)放射性Csの除去率、(b)汚染土壌の減容率、(c)濃縮残渣(脱水ケーキ)の放射性Cs濃縮倍率、および(d)濃縮残渣処理の自動化による作業員の被曝線量の低減効果を評価する目的で行なった。実証試験の主な結果を以下に要約する。1)含有放射線量が8,790~26,270Bq/kgの7試料の元土壌(feed)は、洗浄処理によって882~2,940Bq/kgと全て3,000Bq/kg以下の洗浄土となった、2)放射性Csの除去率は概ね84~92%であった、3)汚染土壌の減量率は74~88%(ave.84%)、嵩比重によって減容率に換算すると70~86%(ave.82%)であった、4)濃縮残渣の自動化処理によって、作業員の年間の被曝線量は自動化前の14%まで小さくなった。一連の試験によって、土壌洗浄によって放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化が効果的に行なえること、および濃縮残渣処理の自動化によって作業員の被曝線量が大幅に低減することが実証された。
75			ど 土壌の浄化・減容技術に関する技術情報	
76	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ど 土壌細粒分等からの常温常圧下でのCs容離および容離したCsの吸着・濃縮による減容化技術—放射性物質による環境汚染と対策の現状—	放射能汚染された土壌の除去物、焼却灰など放射性Csの付着した土壌細粒分から薬液を用いてCsのみを分離回収する技術について検討を行った。溶離されたCs分を吸着剤に吸着して高濃度汚染物の減容を図ることができる。フッ化物塩水溶液を用いる薬液処理法であり、汚染土壌を薬液処理し、Cs分を溶離、固液分離した後、フッ化物塩溶液は循環再利用可能である。またCs吸着剤としてフェロシアン化物塩を利用する。
77	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ど 土壌洗浄による除去土壌の浄化・減容化—放射性物質による環境汚染と対策の現状—	放射能汚染された土壌から放射性物質を分離除去して土砂を再生する技術について検討を行った。鴻池組では湿式分級に表面研磨を付加した土壌洗浄法に取り組んでおり、汚染土壌の減容化の成果について紹介した。分級洗浄のみでは効果が低いが、表面研磨を併用することによって除染率を高めうることが明らかになった。本法は比較的放射性セシウム濃度の低い土壌浄化・減容化に効果があり、被災地域の復旧に貢献が期待される。
78	土壌物理	放射性	ど 土壌への放射性Csの吸着メカニズム	土壌に沈着した放射性Cs+は雲母類の持つCs+高選択性の負電荷であるフレイドエッジサイトに固定される。一方、土壌中には放射性Csの固定に十分な量のフレイドエッジサイトが存在するにもかかわらず、一部の放射性Csは固定されず、2:1型層状ケイ酸塩鉱物の層間に存在するイオン交換サイトに交換態として存在している。土壌中で放射性Csが固定態として存在しているか、交換態として存在しているかを評価することは、土壌中での動態や植物移行を考慮するために重要である。本総説では、土壌中での放射性Cs動態モデルや植物移行モデルを開発精緻化するために必要な知見として、放射性Csの吸着固定メカニズム、土壌が放射性Csを捕捉するポテンシャル(放射性Cs捕捉ポテンシャル、RIP)の評価法、有機物や反応時間など固定反応に影響をおよぼす因子について解説した。
79	土壌物理	放射性	ど 土壌中の放射性Csの移動	Cs+は2:1型粘土鉱物の端面のFrayededgesite(FES)や面部の六員環に非常に強く捕捉される。ただ、Cs+がFESIに捕捉されるまでには100日スケールの時間を要する。本稿では、イオン態で存在するCs+の土壌中で予想される移動とCs+が有機性コロイドに吸着して移動したと考えられるケースを紹介する。イオン態で存在するCs+については、線形ではなくFreundlich型吸着等温線を用いて土壌中の移動を数値計算で検討したところ、Cs+の移動が初期状態の時に存在するイオン種に影響を受ける結果となった。一方、リター層が林床を覆うような林地で調査した結果では、土中の放射性Csの深さ分布が土壌の全炭素量やC/N比と高い相関を示した。これは、Cs+が分解しつつある有機物と共に下方に移動していることを示唆している。
80			ど 土壌から作物へ、セシウムの移行とその要因	
81			ど 道路維持管理に伴い発生する放射性セシウム含有土砂の分級洗浄処理実験	

通番	検索先	検索key	文献名	要約
82	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	な ナノカルシウムによる放射性セシウム汚染土壌の除染技術	2011年3月11日に発生した東日本大震災は東京電力福島第一原発の事故を引き起こし、そこから漏れ出た放射性物質による深刻な土壌汚染をもたらした。なかでも、約30年にも及ぶ長い半減期をもつ放射性セシウム(137Cs)による土壌汚染は、生物学的にも深刻な影響を示す可能性がある。それ故、適切な溶媒による汚染土壌の洗浄や抽出による除染に多くの関心が寄せられている。しかしながら、そのような湿式除染技術は、廃水の発生やその処理について克服すべき課題がある。このような背景のなか、我々は既に、常温常圧かつ乾燥条件下、ナノ粒子化した鉄/金属カルシウム/酸化カルシウムからなる分散体(Fe-nCa)が重金属類の不溶化や汚染土壌の減容化に効果があることを見出し、本手法を放射性セシウムの除染技術として応用を試みた。様々な検討の結果、放射性セシウムによる実汚染土壌に対して、同条件下で90%以上の除染率と50~60%程度の土壌減容化率を達成した。そこで本論文では、Fe-nCaによる乾式迅速除染技術を紹介し、次いで、大量処理へ向けて装置選定や薬剤組成の改良の取り組みについて述べる。(著者抄録)
83	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	な ナノバブル水を用いた放射性物質汚染側溝汚泥の洗浄減容化実証試験	放射性物質で汚染された地域の道路側溝には、道路及びその周辺から放射性物質を含んだ土壌等が流れ込み蓄積している。除染作業によって取り除かれた側溝土壌を効率的に除染(洗浄)し、国が計画している中間貯蔵施設で保管する土壌(8,000Bq/kgを超えるもの)の体積をできるだけ減らすことが求められている。その減容化の方法として、放射性物質(134Cs、137Cs)は土壌中の粘土成分に多く吸着されていることから、土壌中の礫・砂成分から粘土成分を洗浄・回収することにより、礫・砂成分の放射能濃度を8,000Bq/kg以下とし、保管が必要な土壌体積を減容化することが有効である。本実証試験では、比較的放射能濃度が高い側溝汚泥を対象に、界面活性剤の機能を持ち洗浄能力が高いナノバブル水を用いて側溝汚泥中の直径約75μm以下のシルト・粘土成分を効率的に洗浄・回収し、更に二段のサイクロンを通して放射性Csが高濃度に吸着されている直径約5μm以下の粘土成分を分離・回収する試験を行った。試験の結果、元側溝汚泥中の全放射能のうち74%が回収され、保管基準値を超える土壌の重量は、全重量の8.8%までに低減でき、本装置による高い洗浄減容化効果が確認できた。(著者抄録)
84			ね 熱処理減容化等プロジェクト報告	
85	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ね 粘土鉱物からのCs吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(3) TR-DXAFSおよびSTXMIによる粘土鉱物への吸着挙動解析	福島県の環境修復目的でCs吸脱着機構の解明と放射性セシウム含有の廃棄物減容化のための脱離法の開発を行っている。本発表は、福島県産パーミキュライトに対してのセシウム吸着過程を時間分解分散型EXAFSおよび透過型X線顕微鏡を用いる実験で明らかにしたので報告する。(著者抄録)
86	国会図書	ー	ね 粘土鉱物からのCs吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(2) XAFS法による粘土鉱物のCs吸着構造と特異吸着サイトの解明	本研究では、粘土鉱物へのCs吸着メカニズムの解明およびその剥離方法の開発を目的として、粘土鉱物に吸着したCs周りの構造をXAFS法により県トのうした。本公園では、XAFSデータの解析結果に区ウエ、Csが吸着した粘土鉱物を剥離剤で処理した時の剥離メカニズムや、処理後に残るCs特異吸着サイトについても議論する。
87	国会図書	ー	ね 粘土鉱物からのCs吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(4) 熱処理粘土鉱物におけるセシウム移行挙動の解明	土壌および粘土鉱物との混合物の高温熱処理時におけるセシウムの挙動について、放射光イメージング技術を使用したその場観察およびX線吸収端を使用した放射光XAFS分析について調べた。
88	国会図書	ー	ね 粘土鉱物からのCs吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(5) 第一原理計算が示す粘土鉱物におけるCsの微視的吸着機構	原子力機構では、福島復興のため、環境中に拡散された放射性セシウムの除染の際に発生してしまう膨大な除去廃棄土壌の減容化のための研究開発を進めており、原子力機構と物材機構が中心となり複数の大学・研究機関と連携することで広く異なる分野に跨る英知を結集させ、放射性セシウムの環境中での化学形態や物理化学的挙動の解明と減容化のための既存知見の整理と新たな技術革新を目指した研究開発を実施している。本報では、その一環として行っている放射性セシウムの土壌への化学吸着形態と吸着ダイナミクスの計算科学的手法による解明という原子・分子レベルでの研究課題についてのこれまでの研究成果を報告する。得られた成果は、第一原理計算手法を用いて調べた放射性セシウムの土壌中化学吸着形態と、化学反応分子動力学を用いて調べた土壌粘土鉱物への吸着ダイナミクスであり、これらについての概要を報告する。
89	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ね 粘土鉱物からのCs吸脱着機構の解明と減容化のための脱離法の開発(1) 福島産パーミキュライトによるCs吸脱着挙動	福島県の環境修復目的でCs吸脱着機構の解明と放射性セシウム含有の廃棄物減容化のための脱離法の開発を行っている。本発表は、福島県産のパーミキュライトを用いてセシウムの吸着及び化学処理による脱離研究を行った結果について報告するものである。(著者抄録)
90	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	ね 粘土鉱物-セシウム相互作用研究の最近の動向	
91	J-STAGE	セシウム、吸着	ね 粘土鉱物に吸着したセシウムの水相における移行現象	
92	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	の 農地土壌等における放射性物質除去技術の開発	
93	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	は 廃棄物熱処理実験プラントを用いた災害廃木材燃焼時の放射性セシウムの熱分配挙動および溶出特性	東日本大震災に付随し発生した東京電力福島第一原子力発電所事故により、環境中に大量の放射性物質が放出された。長半減期の放射性セシウムの環境中への残留が、長期に渡る深刻な環境問題として残されている。焼却処理の重要な機能のひとつに「減容・減量」があるが、他方、特定の元素にとってそれは焼却灰への「濃縮」ともいえる。加えて、東日本大震災の大きな特徴の一つである大津波の影響で、通常のごみ質よりも塩分濃度が高まっていると考えられる。また、雨水等による焼却灰からの放射性セシウムの水への溶出特性を把握することは急務の課題といえる。本研究では、クリアランスレベル程度の低レベルに放射性セシウムを帯びた災害廃木材を対象とし、廃棄物熱処理プラントでの制御燃焼試験を行い、投入物、主灰、飛灰、およびそれぞれの溶出液中のCs-134およびCs-137の放射能濃度を測定し、その熱分配挙動および溶出特性を把握するためにに行った実験結果を報告する。
94			は 廃棄物・土壌処分技術手法開発等プロジェクト報告	
95	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	ば BAT(混気ジェット旋回流ポンプ)等による汚染土壌の減容化	本除染システムは、BAT(混気ポンプ)とサイクロン・分級機及び水浄化装置から構成される。放射性セシウムに汚染された砂礫を、混気ジェット旋回流ポンプを用いて低圧力水及び空気と混合し、固体試料と水と気体の3相混気流体の中で、ポンプ特有の強旋回と気泡バブル洗浄作用も利用し砂礫を洗浄する。洗浄済砂礫の分級後に、その泥水を高性能凝集剤を使い水浄化設備で浄化し、掬いとった汚泥残渣(スカム)は自然乾燥後、遮蔽コンクリート専用容器に一時保管する。これらは既存技術の改良と簡単な運転操作、少人数体制での維持管理が可能である。今回、環境に負荷を与えない省エネルギーシステムで簡潔かつ合理的な放射性セシウム汚染砂礫等の高除染技術を実証した。(著者抄録)
96	環境放射	ー	ば パーミキュライトを模擬土壌としたセシウム除染条件の検討	福島第一原子力発電所での事故による、土壌や水中の大量の放射性Csが深刻な問題となっている。土壌中のパーミキュライトのような粘土鉱物に固定された放射性Csが土壌除染を困難としている。本研究では、模擬土壌としてパーミキュライトを用いた土壌中のCs除染の最適条件を検討した。また、パーミキュライトへの純水中、海水中からのCs+吸着率はそれぞれ99.4%、31.6%であった。そして、溶出試験では(NH4)2CO3、(COOH)2の濃度が高いほどCs溶出に効果的であった。磁化Na-P1型ゼオライト、磁化モルデナイトをパーミキュライトからCs+溶出後のCs吸着材料として用いた。模擬除染試験から、磁化モルデナイトの方が磁化Na-P1型ゼオライトより優れたCs吸着特性を有していた。液中相からのネオジム磁石を用いた磁場回収率は、磁化ゼオライトの分解のために、(COOH)2濃度の増大につれて減少する傾向にあった。

通番	検索先	検索key	文献名	要約
97	日本原子	減容化	ば パルスパワー放電を活用した骨材再利用による汚染コンクリートの減容化	福島第一原子力発電所の事故によって多量の放射性汚染コンクリートが発生している。放射性廃棄物としての汚染コンクリートの減容化に対するパルスパワー放電の適用可能性が調査された。汚染コンクリートは、パルスパワー放電過程で、非汚染粗骨材を汚染マトリクスから分離することにより除染される。本研究では、放射性汚染コンクリートを模擬するために、Csの安定同位体を用いた。試験の結果、汚染コンクリートから回収された骨材の体積は最大で60%であり、一方で、回収骨材中のCsはおおよそ3%であった。大部分のCsは、放電過程で水中に移行した。これらの結果より、パルスパワー法によって、骨材の再利用による汚染コンクリートの減容できる可能性が示された。本手法の実際の廃棄物への適用性を評価していくため、より実際の廃棄物に近い条件で試験を実施する必要がある。
98	J-STAGE	減容、放射性	ふ 粉碎・選別技術総論	This paper describes the outline of comminution and separation technology for creating the "Sound Material Circulation Society". In especial, the importance of such technology was emphasized by introducing the "3R" concept. Improving mechanism of the liberation of compositional materials in comminution process, properties of two kinds of separation technologies, soft and hard separations, applicable size range for soft separation, adequate combination flow of separation technologies, and evaluation method of separation results were introduced
99			ふ 福島県除染技術実証事業 実地試験結果（平成23年度）	
100			ふ 腐敗性廃棄物（草本類）の減容化と保管時温度変化に関する検討（速報）	除染業務に伴い多量の腐敗性廃棄物の発生が見込まれている。しかしながら安定した減容化方法である焼却による減容化は一般市民に受容されていないのが現状である。そこで、本検討では枝葉、刈草、腐葉土をサンプルとし、チップーとともに、圧縮力227kN/m <sup>2</sup> 、1040kN/m <sup>2</sup> の圧縮機での減容を試みた。また、チップ化した枝葉およびチップ化した後圧縮した枝葉を断熱保管し、温度変化を記録した。チップ化と圧縮力1040kN/m <sup>2</sup> 程度の圧縮により枝葉が原型（自重圧縮なし）の1/8程度に減容できた。枝葉の原型圧縮は227kN/m <sup>2</sup> では1/2以下程度の減容であるが、1040kN/m <sup>2</sup> の圧縮で1/2～1/3に減容できた。刈草は227kN/m <sup>2</sup> で1/4程度、1040kN/m <sup>2</sup> で1/10程度に減容できた。温度測定期間中発火が懸念される摂氏75度以上とはならなかった。今後も継続的に温度変化を測定する予定である。
101	J-STAGE	放射性、土壤、減容化	ふ 福島第一原子力発電事故で汚染された堆肥の汚染原因と処分方法	福島第一原子力発電所の事故により広範囲に拡散した放射性セシウムが牛糞を主な原料としている堆肥生産に与えた影響を、本宮市白沢有機センターをフィールドとして測定し評価した。7月上旬ごろまでに搬入された牛糞からの堆肥のセシウム濃度が高く、規制値（400Bq/kg）を超えている。屋外保管のワラや牧草の使用は禁じられていたが、屋内保管のワラからもセシウムが検出された。このようなセシウムが、牛の代謝や堆肥化の過程で濃縮されるため、堆肥が汚染されたと考えられる。白沢有機センターだけで1000トンの堆肥が使用できずに保管されている。焼却処分の可能性を知るため、燃焼熱や焼却灰量を測定した。自然するだけの燃焼熱を有している。保管中のセシウム流出の可能性を知るため、水での溶出試験を行った。水を濁らす成分も合わせて測定したが、溶出量はわずかであった。
102			ふ 福島県除染技術実証事業_実施結果（平成24年度第1回）	
103			ふ 福島県除染技術実証事業_実施結果（平成24年度第2回）	
104	J-STAGE	放射性、土壤、減容化	ふ 福島第一原子力発電所事故による汚染土壌からの放射性セシウムの除去と吸着	放射性物質によって汚染された土壌からの放射性セシウムの除去と吸着に関して検討した。除去操作では、汚染土壌として砂試料、除去溶液としてチオ尿素を添加した比較的低濃度の硫酸溶液を用いた。汚染された砂試料1kgに対し少なくとも0.1Mチオ尿素を含む1M硫酸溶液1Lを用い90℃で加熱することで除去率80%が得られた。また、チオ尿素を含む硫酸溶液の液量を増やすことで90%以上、そして除去操作を2回繰り返すことで96%の除去率が示された。本法を実用的のあるものとするために特注のステンレス製除去装置を用い検討した。その結果、基礎的な実験結果とほぼ同様な除去率が得られた。吸着操作では、砂試料から除去した放射性セシウムを含む汚染水、吸着剤としてゼオライトと活性炭を用い検討した。秋田県産のゼオライト2種と市販の活性炭3種を用い放射性セシウムの吸着について検討したところ活性炭へはほとんど吸着されなかったが、ゼオライト2種では共に96%以上の吸着率が得られた。さらに、放射性セシウムの吸着について振とう時間やゼオライト量を変化させ吸着率への影響について検討すると共にゼオライトをガラス製カラムに入れたフロー式による吸着についても検討した。
105			ふ 不燃系等減容化及びコンクリート技術適用プロジェクト報告	
106	CiNii	土壤、放射性セシウム	ふ 福島県の磁性土壌に対する放射性セシウム濃度分析	福島第一原子力発電所事故後(2011年4月30日)に福島県で採取した土壌に対して、磁石に吸引された土壌成分(磁性成分)とそれ以外の成分(非磁性成分)に分離後、それぞれの成分の放射性セシウム濃度分析を行った。磁性成分の単位重量あたりの放射性セシウム濃度は非磁性成分に比べ高く、その比は最大4倍近くに達した。
107	JDream	土壤、減容化、放射性セシウム	ふ 福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質汚染土壌の減容化手法(1)汚染土壌から分離した放射性セシウム吸着粘土の特性評価	福島第一原子力発電所事故による汚染土壌の減容化のために、放射性セシウム濃度の高い土壌を分離することが重要である。本研究では、汚染土壌から、高濃度に放射性セシウムを吸着した粘土を分離し、その特性評価を行った。(著者抄録)
108	CiNii		ふ 福島県相馬郡飯館村および双葉郡浪江町における表層土壌中の粘土鉱物の特徴(A17)	
109	日本原子	分級	ふ 福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務報告書；除染技術実証試験事業編(受託研究)	除染作業に利用できる技術について民間企業から技術提案を受け、その除染効果を経済性、安全性等とともに検証する「除染技術実証試験事業」を内閣府からの委託を受けて実施した。原子力機構は、土壌分級、超高圧水除染や有機物の減容技術等の25件の技術を採用し、実証試験への助言及び評価を実施した。
110			ふ 福島県除染技術実証事業_実施結果（平成25年度）	
111			ふ 一土壤科学者としての考察と新提案－復興農学の原点を里山の活性に求めて－(特集 復興農学がめざすもの：東日本大震災からの復興への貢献と課題)	
112	産業技術	減容化	ぶ 分級分析による飯館村農地土壌のセシウム吸着特性および放射性セシウムの分布(口頭発表、一般講演)	放射性セシウム汚染土壌は分級洗浄法で細粒分を除去することで減容化できることが知られているが、土壌構成鉱物との関係性は明確ではない。そこで、福島県飯館村農地土壌を対象に、放射性セシウム汚染土壌と安定セシウムを吸着させた同非汚染土壌を分級して各セシウム濃度と鉱物組成の比較を行った。その結果、粘土鉱物の分級画分でセシウムの濃度が高く、0.2μm以下のコロイド画分へのセシウムの分配は少ないことなどが確認された
113			へ 平成23年度「除染技術実証試験事業」の結果概要	
114			へ 「平成24年度除染技術実証事業」に係る実証試験対象技術の選定結果及び「平成23年度除染技術実証事業」に係る評価結果の公表について	
115			へ 「平成25年度除染技術実証事業」に係る実証試験対象技術の選定結果及び「平成24年度除染技術実証事業」に係る評価結果の公表について	
116			へ 「平成26年度除染技術実証事業」の対象技術の募集及び「平成25年度除染技術実証事業」の評価結果について	
117	JDream	土壤、減容化、放射性セシウム	ほ 放射性セシウム汚染土壌の洗浄処理に関する検討	福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性セシウムにより広い範囲が汚染され、その除染が急務となっている。著者らは、放射性セシウムに汚染された土壌の浄化および減容化を図るため、従来から重金属汚染土壌の浄化に用いられている土壌洗浄工法に着目し、その適用を検討してきた。本報告は、実際の汚染土壌について、室内試験および土壌洗浄小型試験機を用いて実施した実証試験の内容およびその結果を報告するものである。なお、本報告は、独立行政法人日本原子力研究開発機構が実施している内閣府委託事業「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務」の一部である平成23年度「除染技術実証試験事業」のうち、「湿式分級に表面研磨を付加した土壌洗浄処理技術による放射能汚染土壌の減容化」として実施した成果を取りまとめたものである。(著者抄録)
118	地盤工学	放射性セシウム	ほ 放射性セシウム含有土壌の分級洗浄処理に関する基礎検討	
119		洗浄	ほ 放射能汚染土壌の土壌洗浄処理の検討	

通番	検索先	検索key	文献名	要約
120	土木学会	放射性セシウム	放射性セシウム汚染土壌の多段階土壌洗浄処理	The objective of this study is to make clear the influence of mechanical splices arranged at the same cross section on the behaviour of RC members subjected to cyclic lateral load. Five RC cantilever column specimens were tested using some types of mechanical splices arranged at the same cross section under cyclic lateral loading. Load - displacement curves and strain distributions show that specimens with mechanical splices had a better performance than the specimen without mechanical splice: higher strength and deformation capacity, better energy dissipation characteristic.
121	土木学会	放射性セシウム	放射性セシウム含有碎石の洗浄処理に関する基礎的検討	CommonMPは標準でモデル構築のためのGUIを搭載しており、要素モデルを繋ぎ合わせることで流域を再現することができる。しかし流域が大きくなると要素モデルの数が多くなり、それぞれの要素モデルは独立しているためパラメタ設定が煩雑となる課題がある。本研究ではCommonMP上でシミュレーションする際の課題を解消することを目的としCommonMP多重実行環境を開発した。
122	土木学会	洗浄	放射性汚染物質を含む土壌の洗浄処理に係る基礎的検討	To solve the reinforcement congestion, new anchor system is investigated analytically in this study. The pull-out experiment of reinforcement included mechanical anchorage was carried out by Tadokoro et al to examine the anchorage performance in thin cover zone. The mechanical anchorage subjected to local stress by anchor plate, is strongly affected the arrangement of anchor plate on anchorage performance. In this study, the 3D RBSM is used to simulate the anchorage failure of mechanical anchorage varied in arrangement. Crack patterns could be simulated similarly to observed in the experiment.
123	CiNii		放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化へのマイクロバブルフローテーション法の適用（第25回：震災廃棄物の処理・リサイクルと課題）	
124	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化—マイクロバブルフローテーションを利用したアトリクション分級洗浄—放射能除染技術	放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化技術として、マイクロバブルフローテーションを利用した分級洗浄による方法について紹介した。放射性セシウムを含むシルト/粘土の土微粒子を除去する分級洗浄法であり、放射性セシウムが吸着・収着したシルトや粘土等の土微粒子分のみを分離除去することで大幅な減容化が期待できる。固液分離技術としてマイクロバブルフローテーションを採用することにより、二次廃棄物の発生抑制、高次濃縮への展開も可能になる。汚染土壌の除染・減容化技術のフロー図の説明と、実証実験により確認された効果(汚染土壌の除染率:92%, 減量率:72%, しかし設定した分級点以下の微粒子分は11%であることから、洗浄・分級効果をさらに高める余地がある)について報告した。
125	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性物質による環境汚染の対策技術—除染除去物の減容化と保管・処分技術—放射能除染技術	東日本大震災による原子力発電所の事故により放射性物質が環境中に放出され、現在、除染事業が進められている。除染技術のうち、除去物の洗浄・焼却による減容化技術、減容化により高濃度化する除去物の溶出抑制・遮蔽等の保管・処分技術について説明した。除去土壌を洗浄・分級して再利用する「洗浄による減容化技術」(分級処理のみの放射性セシウムの除去率は58~87%,スクラビング(擦り洗い)とフローテーション処理を加えた場合の除去率は83~96%と向上),可燃性の有機物系廃棄物について焼却・無機化する「焼却による減容化技術」(焼却灰に放射性物質が濃縮されるので、焼却炉の選定・遮蔽対策・運転・メンテナンスに注意必要),焼却灰の固化・固形化技術(セメントと水を混練して固形化する方法とフレコンバッグに挿入し、その隙間にセメント系材料を充填する方法),鉛ガラスレットの遮蔽体利用技術(ガラスレットをコンクリート骨材として使用した放射線遮蔽能力を有するコンクリートの開発)について説明した。
126	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射能土壌の高速除染処理システム—放射能粘土質土壌の除染処理と減容化技術—放射能除染技術	福島原発事故発生以来、放射性物質は土壌表面から約3cmの深さまでに蓄積していることを突き止めた。本装置は放射性セシウムを含む粘土層のみを除去し、除染した砂礫層をもとに戻すことで、汚染土壌を減容化するものである。高圧ジェット水流(空気伴走の高速・高圧ジェット水流中に土壌塊を投下するだけで、砂礫層と粘土層を迅速簡便に分離でき、除染率は90%)と放射性物質吸着剤のファイライト(千枚岩)充填濾過槽を使用することで、懸濁液からの粘土層の分離と粘土層の迅速処理回収を可能にした。放射性土壌の処理速度は15m <sup>3</sup> /時間である。
127			放射性物質と土壌汚染	
128	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	放射性セシウム除染と戦略的農地資源保全	東日本大震災後の放射性物質による被害の復旧対策の一つとして放射性セシウム(Cs)の除染が求められおり、農林水産省は農地への対策を実施しようとしている。しかし、効果的な復旧につなげるには、除染だけではなく、区画整理を初めとする対策の戦略的・総合的な実施が求められる。本論ではCsによる負荷の特徴を空間的広がり、土地利用、土地改良、労働環境の側面から検討し、以下の観点から提案を行った。①除染対策の実施においてはCsの封じ込め、拡散防止、長期の安全確保を原則とし、農地を生産環境・労働環境の両側面から改善する。②除染の効果的実施のための戦略的取り組みを総合的・一体的に行うとともに、除染をこれらとの関係の中に位置づける。
129	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性物質に汚染された土壌の除染・減容化技術	福島第一原発事故により環境中に放射性セシウムが放出され、汚染された土壌が大量に発生している。当社では過去にPCB汚染土壌の還元加熱による浄化技術を開発しており、同技術をベースに放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化プロセスを検討した。その結果、汚染土壌に効果の異なる二種類の添加剤を混合し、1000℃にて30分以上加熱することにより、放射性セシウムを90%以上揮発除去し、除去土壌を大幅に減容化できることを見いだした。(著者抄録)
130	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射線防護 放射性セシウム汚染土壌の除染・減容化技術	放射性セシウムの土壌中にでの特徴、対策方法の整理、及びこれらの課題に関し、下記事項などについて解説した。1)土壌中における放射性セシウムの特徴、2)土壌中の放射性物質濃度の経時変化(ヨウ素131,セシウム134,セシウム137),3)放射性セシウム汚染土壌対策の考え方と対策手法、4)汚染土壌の除去におけるフレームワーク、a)土壌除去技術、b)減容化技術。
131	J-STAGE	放射性、土壌、減容化	放射性セシウム含有土壌への酸抽出方法の適用性に関する基礎的検討	本研究では放射性セシウム汚染土壌の減容化技術の一つである酸抽出法を対象として、基礎的な知見及び粘性土への適用性を得ることを目的とした。試験は、事故後9か月の時点で福島県内から採取した土壌を用いて、複数の条件で酸抽出試験を実施した。その結果、放射性セシウムの抽出効率は6mol/L-硝酸において24%~71%の範囲であり、砂質土(Sand)では抽出効率が非常に高いが、シルト・粘土分が多い土壌では抽出効率が低くなる傾向が確認された。また、福島県内の水田に多い灰色低地土については50%程度の抽出効率となることが確認された。
132	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性物質汚染土壌等からの乾式Cs除去技術の開発	都市ごみを焼却した焼却灰、学校の校庭などで剥ぎ取った表土、稲わら、剪定枝など放射性セシウムを含む廃棄物が大量に発生し、その減容化が課題となっている。減容化の方法としては熱処理によるセシウム除去がある。熱処理によりセシウムを昇華させ、昇華したセシウムは冷却後、バッグフィルタなどでフライアッシュとして回収する。そこで本研究は、放射性セシウムを含む汚染物に高性能反応促進剤を添加して熱処理し、セシウムを昇華・分離した浄化処理物はクリアランスレベルの100Bq/kg以下となった。回転式連続処理装置を作り、これによる実汚染土壌の浄化処理試験は、基準以下の浄化処理物を得ることができた。
133	国立環境研究所		放射性物質を含む廃棄物の焼却処理	
134	国立環境研究所		放射性物質汚染廃棄物の適正処理に向けた課題	
135	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性物質汚染土壌等からの乾式Cs除去技術の開発	一般に、放射性物質で汚染された土壌等からセシウム(Cs)を分離することは困難であるといわれている。本研究では、熱処理によってCsを昇華させて浄化処理物を得ることを目的に試験を行った。最初に非放射性Csを吸着させた模擬土壌で試験したところ、単純に熱処理した場合や塩化カルシウムのみを添加した場合には土壌中のCsは除去されないが、開発した高性能反応促進剤を加えて熱処理することにより除去できることを見出した。この知見を基に、数種類の実汚染土壌を用いて試験したところ、土壌中に数万Bq/kg含まれていたCsをクリアランスレベル以下にすることができた。浄化処理物は土工資材として使用でき、放射性セシウムに汚染された土壌等の大幅な減容化ができる。(著者抄録)

通番	検索先	検索key	文献名	要約
136			放射性セシウム含有バイオマスの減容化に関する研究	本報告は、バイオマスガス化発電技術に着目し、同技術による放射性セシウム含有バイオマスの減容化の可能性について検討したものである。福島第一原子力発電所事故に伴い、環境中に放射性セシウムが放出され、広範囲の草木類に放射性セシウムが含まれることとなった。今後長期間にわたって放射性セシウムを含む草木が発生することが想定されることから、これらの草木をバイオマスガス化発電の原料として利用し、再生可能エネルギーを回収しながら、コストをかけないで減容化する手法について検討した。なお、本検討は環境省の「平成23年度除染技術実証事業」のうち「除染に伴い発生する有機物のバイオマスガス化発電による減容化及びエネルギー回収」として実施した成果を取りまとめたものである。
137	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性セシウムの土壌吸着反応における数値シミュレーション解析の進展	福島第一原子力発電所での事故により地表へと降着した放射性セシウムは、地表面にその多くが長期に渡って留まることが知られており、住民にとって主要な被ばく源となることから国や自治体により大規模な除染が行われている。しかし、その除染により発生する廃棄土壌の量は膨大なものとなるため、効率的且つ経済的な土壌減容化技術の早期確立が渴望されてきた。しかし、その技術を科学的根拠に基づき発案及び確立するためには、放射性セシウムと土壌との吸着化学形態やそのダイナミクスをマイクロなレベルから理解する必要がある。しかしながら、原子・分子のレベルから土壌という複雑な系とセシウムの相互作用を理解することは、実験・観察及び理論だけでは困難であり、数値シミュレーションという第三のアプローチが重要な役割を果たすと考えられている。本稿では、この数値シミュレーションによる放射性セシウムの土壌吸着に対するこれまでの取り組みを紹介した後、著者らによる最新の成果を報告し、放射性セシウム吸着機構の一端を明らかにする。(著者抄録)
138			放射性物質を含む下水汚泥の減容化について—福島第一原発事故の影響への取り組み—	
139	土木学会	減容化	放射能汚染土壌の除染・減容化システムの開発	福島県内の公共施設の除染業務において発生した汚染土壌すき取り土に対し、実機プラント製作し減容化処理を実施した。本プラントは、汚染土壌を粒径に応じた2段階（高圧ジェット水流洗浄およびマイクロバブル渦崩壊洗浄）の水洗浄装置（薬剤等を使用しない）と濁水を再利用できるマイクロバブル浮上分離濁水処理装置を特徴とする。本プラントの実稼動において、洗浄砂、脱水ケーキの処理量、放射能濃度を測定し、プラント運転条件、汚染土壌性状に対する処理能力、操作性、減容化率を確認した。
140	産業技術	減容化	放射性セシウム含有土壌の土壌洗浄法の適用性評価試験	本研究では、放射性Cs含有土壌の減容化手法の一つである土壌洗浄法の適用を検討する際の事前判断基準の提供を目的として、適用性評価に資する事前試験方法の検討および実際の土壌に対して適用性試験を実施した結果を報告する。なお、本稿は公益社団法人地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会地盤環境研究委員会タスクフォースN1のメンバーが中心となり取りまとめた「放射性セシウム含有土壌の土壌洗浄法の適用性評価試験方法(案)：以下、本試験方法」の内容を中心とし、既報告済みのデータを用いて放射性Cs汚染土壌に対して本方法を検証した。
141	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性Cs汚染土壌の浄化・減容化システム—新しい洗浄技術による効率的な減容化と濃縮残渣処理の自動化による被曝線量の低減化—	除染事業において汚染土壌等を保管する中間貯蔵施設の建設には広大な用地と巨額の費用が必要となる。このため、放射性Cs汚染土壌の効率的な浄化・減容化と濃縮残渣処理の自動化が可能で新しい洗浄技術を開発した。土壌洗浄法は、重金属類、鉱物油などの汚染物質の多くが粗粒分より細粒分(粘土、シルト)に付着しやすいという性質を利用して、汚染物質を含有する細粒分を除去して土壌を浄化するもので、放射性Cs汚染土壌も同様である。現地の除染により発生した汚染土壌を用いて、土壌洗浄の実証実験を行った。その結果、洗浄土は再生資材として活用可能であり、中間貯蔵施設への搬出量を大幅に低減すること、濃縮残渣処理の自動化による作業員の被曝線量の大幅低減効果が判明した。
142	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性物質を含む汚染土壌処理システム及び焼却灰洗浄減容化システム	
143	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性物質に汚染された土壌の除染・減容化技術—第2報—	福島第一原子力発電所での事故により環境中に放射性セシウムが放出され、汚染された土壌が大量に発生している。前報では加熱処理のラボ試験により土壌から放射性セシウムを揮発除去可能な基礎条件を確立した。今回、福島県A市の協力を得て実施したベンチスケール試験設備を用いた現地実証試験により、ラボ試験結果の検証、そして本プロセスを構成する前処理(洗浄・分級)、加熱処理工程の最適化の検討を行った。試験の結果、実汚染土壌の除染・減容化のための最適条件および全体の処理プロセスを確立し、実用化の目的を得たので、報告する。(著者抄録)
144			放射能汚染土砂の分級・減容化実証実験について	
145			放射性セシウムを吸着し含水汚泥を減容化させる除染用土のう—岩手県放射性物質除去・低減技術実証事業(平成25年度)実証試験結果報告—	道路側溝汚泥を対象にゼオライトを混抄した機能紙を内袋とした土のうを用いて土のうの内部に放射性物質を閉じ込め、水分のみを浸出させ脱水減容化を図る。
146	土壌物理	放射性	放射性物質問題—土壌物理に求められること—	農水省は福島で表土剥ぎ取り法による農地除染を行っている。しかし、汚染土壌の最終処分地は決まっていない。一刻も早い農業再生のためには、農家自らが実施可能な除染方法を開発することが重要である。筆者はNPO法人と協働で、粘土とセシウムの性質を活かした除染法の開発に取り組んでいる。本論文では、いくつかの現場実験を紹介しながら、福島における土壌物理学研究のヒントについて述べる。
147	日本原子	放射、汚染、土壌	放射能汚染土壌の洗浄再生化技術 最新のセンシング/マニピュレーション融合化技術(2)	本技術は、民間の技術力と積極的貢献に基づき福島県放射能汚染地域の再生復興を支援するための事業であり、今後大量発生する放射能汚染土壌の洗浄再生・利用・減容化を目的としている。本稿では、この技術の概要と福島県で実際に行われた高レベル放射能汚染土壌の洗浄再生フィールド実証試験の成果と実用化のための関連機器の紹介をする。
148	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性物質を含む汚染土壌等の洗浄と減容 バイオによる放射能除染への挑戦	福島原発事故により環境に放出された放射性物質による汚染土壌は除染作業後に効率的に中間貯蔵施設に保管される必要がある。ここでは土壌の減容化が重要で、多くの放射性セシウムが吸着している粘土成分を回収することが有効である。焼却灰については水洗浄によりセシウムを溶出させ、保管が必要な灰の体積を低下できる。本報では、1)グラウンド表層土、2)側溝汚泥3)田畑表層土と焼却灰に対するナノバブル水中洗浄および振動篩い分級洗浄などの除染効果を解説した。
149			放射能汚染植物バイオマス減容化バイオ技術の開発	
150	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性セシウム汚染土壌の減容化(その1:化学的除染)	
151	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性セシウム汚染土壌の減容化(その2:表面剥離の試み)	
152			放射能汚染土砂の分級・減容化実証実験について	
153	JDream	土壌、減容化、放射性セシウム	放射性セシウム含有土砂への土壌洗浄技術の事前適用性評価試験—道路維持管理に伴い発生した土砂の減容化に向けて—	
154			放射性汚染物質の減容化に伴うセシウム排出挙動実証試験	

通番	検索先	検索key	文献名	要約
155			放射性汚染物質の減容化に伴うセシウム排出挙動実証試験	
156	土木学会	減容化	放射性物質の固定化・減容化同時処理技術の実証	除染作業等で生じた濁水処理の仮定で、放射性Csを含む汚泥が発生する。通常はフィルタープレス等で減容化処理をしているが、脱水ケーキは降雨や地下水等との接触により再泥化するため、放射性Csが吸着した土粒子が流出する可能性がある。そこで、筆者らは脱水ケーキからの放射性物質の拡散防止と、汚泥の減容化処理を同時に図ることを目的に、真空加圧脱水固化処理工法(SVP)を適用性について実証した。この結果、当該技術により、放射性物質が付着した細粒分の流出防止と減容化の同時処理が可能であることが実証できた。なお、本実証実験は、環境省の平成25年度除染技術実証事業の一環として実施したものである。
157	土木学会	減容化	放射性物質汚染土壌の小型簡易設備による減容化技術の開発	除染に伴い大量に発生している放射性物質を含む土壌等は、仮置きの後、中間貯蔵施設への運搬搬入が計画されている。この中間貯蔵施設への運搬搬入における除去土壌の除染・減容化処理技術の開発が喫緊の課題として挙げられている。この除染・減容化処理技術の開発を目的として、各仮置場や保管場所において除染・減容化処理が可能で、一般的な土壌洗浄技術を応用した、小型で簡易な土壌洗浄技術を考案し、実除染現場において実証実験を行った。その結果、実現場の3000Bq/kg-dry以下の放射性Csに汚染された土壌に適用し、除染率85%~93%程度、減容化率70%程度の性能があることを実証した。
158	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	放射性Csの土壌粒度別分布傾向と分級による減容化への取り組み	
159	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	放射性セシウム汚染土壌の分級分析による減容化と農業用堰の受動的処理効果の検討	
160	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	放射性セシウム汚染土壌の減容化	
161			放射性物質含有下水汚泥(指定廃棄物)の減容化実証事業(減容化処理の完了)中間報告	
162	日本原子	洗浄	放射能汚染土壌洗浄処理における高濃縮汚染残土固形化処理性能評価	570,000Bq/kgを越える福島県下の放射能汚染土壌の洗浄プロセスにおいて固形化工程に使用する可搬型(360mmD360mmH800W)と固定大型フィルタープレス(1880D2140H9085W)の性能評価を行うため、汚染土壌の洗浄試験とそれに基づく放射線量評価を実施し、下記結論を得た。(1)可搬型フィルタプレスにより10%近い減容率を達成するとともに、濃縮固形化に伴う放射線量は出発土壌の1.3-6.7倍に達した。(2)高縮固形化工程における可搬型及び大型固定型フィルタプレス装置の中心における線量はそれぞれ2.5及び196Sv/hであり、特に大型固定型においては通常及び異常時点検補修の際に放射線防護規定の放射線量を越える危険性がある。
163			放射性物質を含む作物残さ・雑草、枝葉等の安定・減容化技術	
164			ボールミル法による土壌中からのセシウムの除去	
165			溶融塩法によるセシウムの土壌から水溶液中への抽出	
166	JDream	土壌, 減容化, 放射性セシウム	溶融塩法による土壌からのセシウムの抽出 資源・素材開発技術の展望	Fukushimalitateから放出された放射性セシウムは10PetaBqともいわれるが、それでも全体を集めれば3.1kg程度しかなく、厚さ26cm外寸70cm角の鉛の箱に閉じ込めて10cm離れた距離で1mSv/y以下にすることさえできる少量である。しかしこの放射性セシウムにより汚染された土壌は福島県だけでも7000km <sup>2</sup> を凌ぐ量にきわめて希薄に広がっている。その被汚染土壌量の膨大さのため、一般に有害物質を処理する際にとられる「取り除く」「隔離する」「眠らせる」の中で「隔離する」に力点を置いているのが現在の除染である。「隔離する」に関しては、分級などで汚染物質のレベルに合わせた管理で減容化を図る方法、セシウムの存在様式の多くの部分が懸濁粘土物質であることに注目した簡便な処理などを提案しているが、同時にそもそもは土壌中には存在しなかった放射性セシウムを「取り除く」技術も減容化されることによって生じる高濃度物質の処理を意識して準備しておく必要があると考え、メカノケミカル法などを試みているが、本稿ではセシウムの熱力学的特性に注目した溶融塩法による土壌からの抽出について報告した。セシウムと土壌除染、セシウムの熱科学的特性、実験方法、実験結果、考察と今後の方向性などについて解説した。

放射性物質汚染土壌の減容化に関する情報  
収集・整理・解析業務

報告書

2014年11月18日

日本工営株式会社

まえがき

本報告書は、国立大学法人 宮崎大学の委託により実施した、放射性物質汚染土壌の減容化に関する情報収集・整理業務および情報解析業務の成果をとりまとめたものである。

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震から 4 年が経とうとしており、東京電力(株)福島第一原子力発電所事故による広域の放射性物質汚染も除染の段階から、中間貯蔵の段階へ移行しようとしている。

除染により大量に発生した土壌・廃棄物については、特に土壌の減容化技術の確立についても技術開発が進められている。これらの技術を集積し、利用者側への橋渡しの一環として技術情報の収集・解析を行った。

本業務を遂行するにあたっては、宮崎大学国際連携センター：伊藤 健一先生に種々のご指導を賜った。ここに、謝意を表します。

平成 27 年 1 月  
日本工営株式会社

## 目 次

1. 業務概要	1
1.1 業務名	1
1.2 業務の目的	1
1.3 業務実施期間	1
1.4 業務実施機関	1
1.5 業務概要	1
2. 減容化手法の分類	2
3. 減容化手法の技術動向の検討及び課題点の抽出	8
4. 減容化手法の解説文作成	13
5. 減容化手法に関する用語解説の作成	15
6. 減容化技術情報の一般公開に向けたスキームの作成	17

## 1. 業務概要

### 1.1 業務名

「放射性物質汚染土壤の減容化に関する情報収集・整理業務委託」および「放射性物質汚染土壤の減容化に関する情報解析業務委託」

### 1.2 業務の目的

本業務は、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質（放射性セシウム）の除染等で発生した汚染土壤の減容化に関する技術リファレンスを構築する目的で、放射性セシウム汚染土壤の減容化技術に関する技術情報の収集・整理を目的としたものである。また、収集・整理された、放射性セシウム汚染土壤の減容化技術に関する技術情報について、課題等の解析を行うとともに情報の公開手法について検討を行った。

### 1.3 業務実施期間

平成 26 年 11 月 18 日～平成 27 年 1 月 30 日

### 1.4 業務実施機関

日本工営株式会社 中央研究所

### 1.5 業務概要

- (1) 減容化手法に関する文献収集
- (2) 減容化手法に関する文献整理
- (3) 減容化手法の分類
- (4) 減容化手法の技術動向の検討及び課題点の抽出
- (5) 減容化手法の解説文作成
- (6) 減容化手法に関する用語解説の作成
- (7) 減容化技術情報の一般公開に向けたスキームの作成

なお、収集文献および整理表については、別途、電子ファイルで添付した。

## 2. 減容化手法の分類

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）は、北海道～千葉県のパシフィック岸において多くの津波災害を引き起こした。また、東京電力（株）福島第一原子力発電所では、原子炉冷却機能喪失事故が発生し、3月12～16日にかけて1～3号原子炉内の放射性物質が大気へ放出された。放出された放射性物質は、広範囲に拡散し地表部に沈着するフォールアウトが生じた。特に3月15日～22日の前線に伴い降雨と共に放射性物質が降下した地域では、いくつかの帯状に高濃度汚染域が形成された。

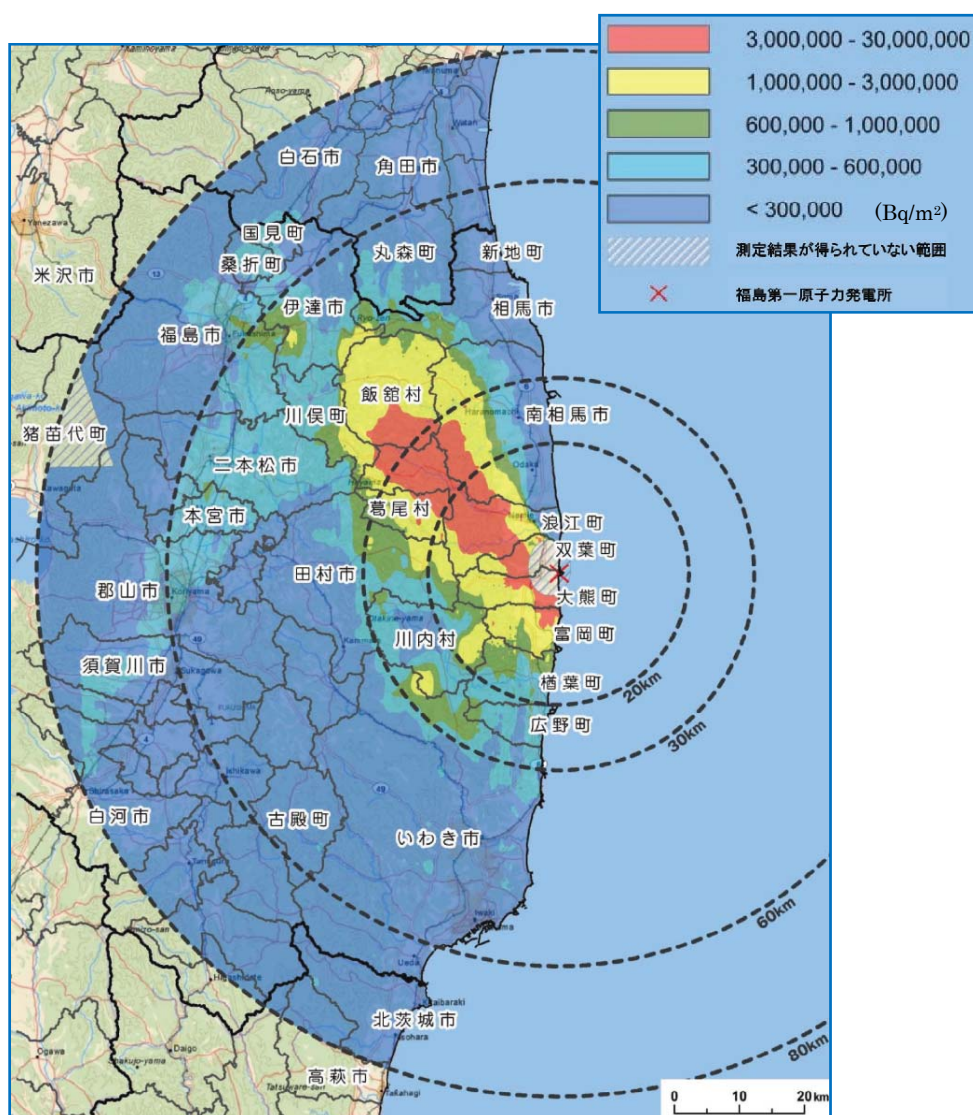


図-1 文部科学省及び米国 DOE による航空機モニタリングの結果

(福島第一原子力発電所から 80 km 圏内の  $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$  の地表面への蓄積量)

注： $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$  の蓄積量 ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ ) [4月29日現在の値に換算]

出典：文部科学省(2011/05/06):第1次航空機モニタリング(2011年4月6日～29日測定)

[http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3710/24/1305820\\_20110506.pdf](http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3710/24/1305820_20110506.pdf)

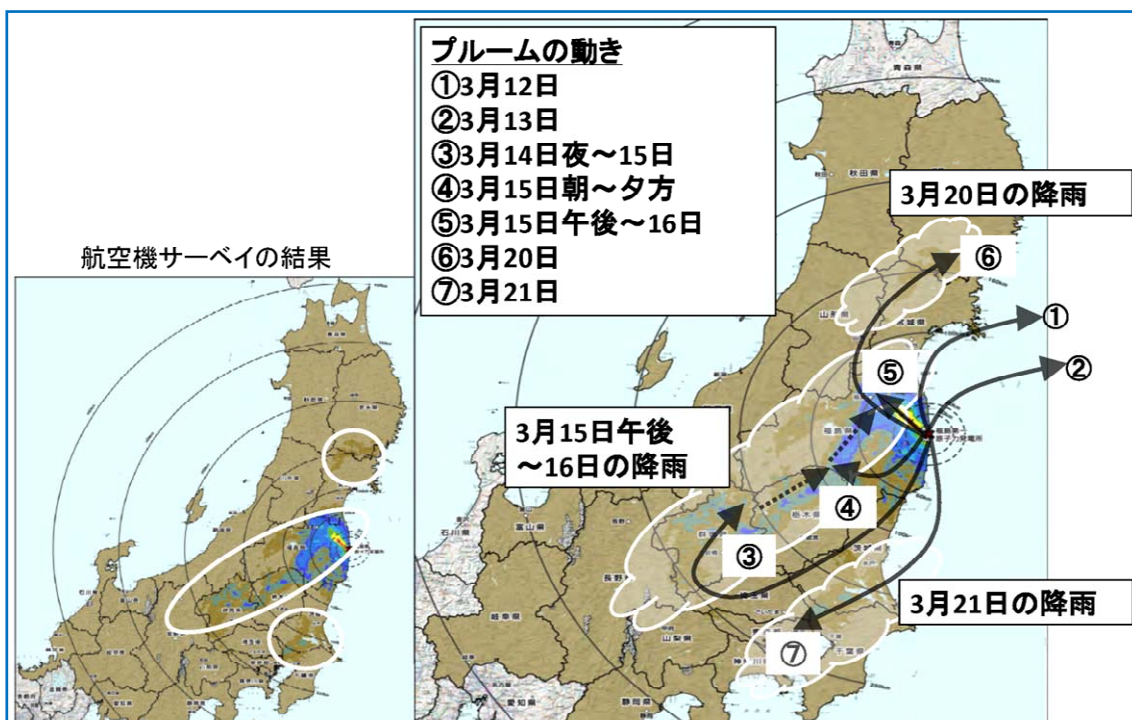


図-2 拡散計算から推定される広域の地表汚染形成プロセス

注：ベースマップは、「文部科学省による第4次航空機モニタリングの測定結果について」を使用

[http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/5000/4901/24/1910\\_1216.pdf](http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/5000/4901/24/1910_1216.pdf)

出典：斎藤公明(2013)：土壌沈着量分布や空間線量率分布マップの作成，(独)日本原子力研究開発機構 研究開発成果報告会講演資料，pp.15

<http://www.jaea.go.jp/fukushima/other/2013-0325/3.pdf>

フォールアウトした放射性物質の対策を目的として、2012年1月1日から「放射性物質汚染対処特措法（正式名称：平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法）」（平成23年8月30日法律第110号）が施行され、国による本格除染が実施される「除染特別地域」と市町村により本格除染の実施計画が策定・実施される「重点調査地域」とが指定されている。また、除染実施にあたって必要となる技術等を取りまとめた「除染関係ガイドライン（初版）」が平成23年12月に公表され、現在もそれに沿って除染が進められている（2014年12月，追補第2版）。

この除染により発生する除去土壌等は、福島県内のみで1,870～2,815万 $m^3$ （内、334～773万 $m^3$ が可燃物）と推定され（表-1），これらは仮置きの後，中間貯蔵施設へ運搬され，減容化等が行なわれ30年以内に福島県外の最終処分場へ搬出される予定になっている（図-3）。また，2011年時点の推計では，福島県外の除去土壌等の発生量は，140～1,300万 $m^3$ と試算されている<sup>注1</sup>。

注1：環境省(2011/10/29)：東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処  
 において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について（資料-1 除染に伴って生じる除去土壌  
 等の試算について） [http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/roadmap111029\\_a-6.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/roadmap111029_a-6.pdf)

表-1 除染計画区域からの除去土壌等の推計発生量（福島県内）

	直轄（万 m <sup>3</sup> ）		市町村（万 m <sup>3</sup> ）		合計（万 m <sup>3</sup> ）	
	土壌等	可燃物	土壌等	可燃物	土壌等	可燃物
<b>●原発生量</b>						
住居・施設等	69～98	24～33	728～800	14	797～898	38～47
田	336～504	57～76	150～154	24～25	628～872	130～173
畑	124～186	23～30				
牧草地・果樹園等	18～28	26～42				
森林（生活圏）	49～196	157～544	（住居・施設等を含む）		49～196	157～544
その他	34～49	1	28	9	62～77	10
小計	629～1,061	287～725	906～982	47～48	1,535～2,043	334～773
合計	917～1,786		953～1,029		1,870～2,815	
<b>●減容化後発生量（可燃物の20%になると仮定）</b>						
小計	629～1,061	57～145	906～982	9～10	1,535～2,043	67～155
合計	686～1,206		915～991		1,601～2,197	

※端数処理により、表中の数字の合計が合わない場合がある。  
 ※今後の除染の実施状況等により、数字の変更の可能性がある。

出典：中間貯蔵施設等福島現地推進本部(2013/12)：除去土壌等の中間貯蔵施設の案について， pp.5

[https://josen.env.go.jp/soil/pdf/draft\\_131214.pdf](https://josen.env.go.jp/soil/pdf/draft_131214.pdf)

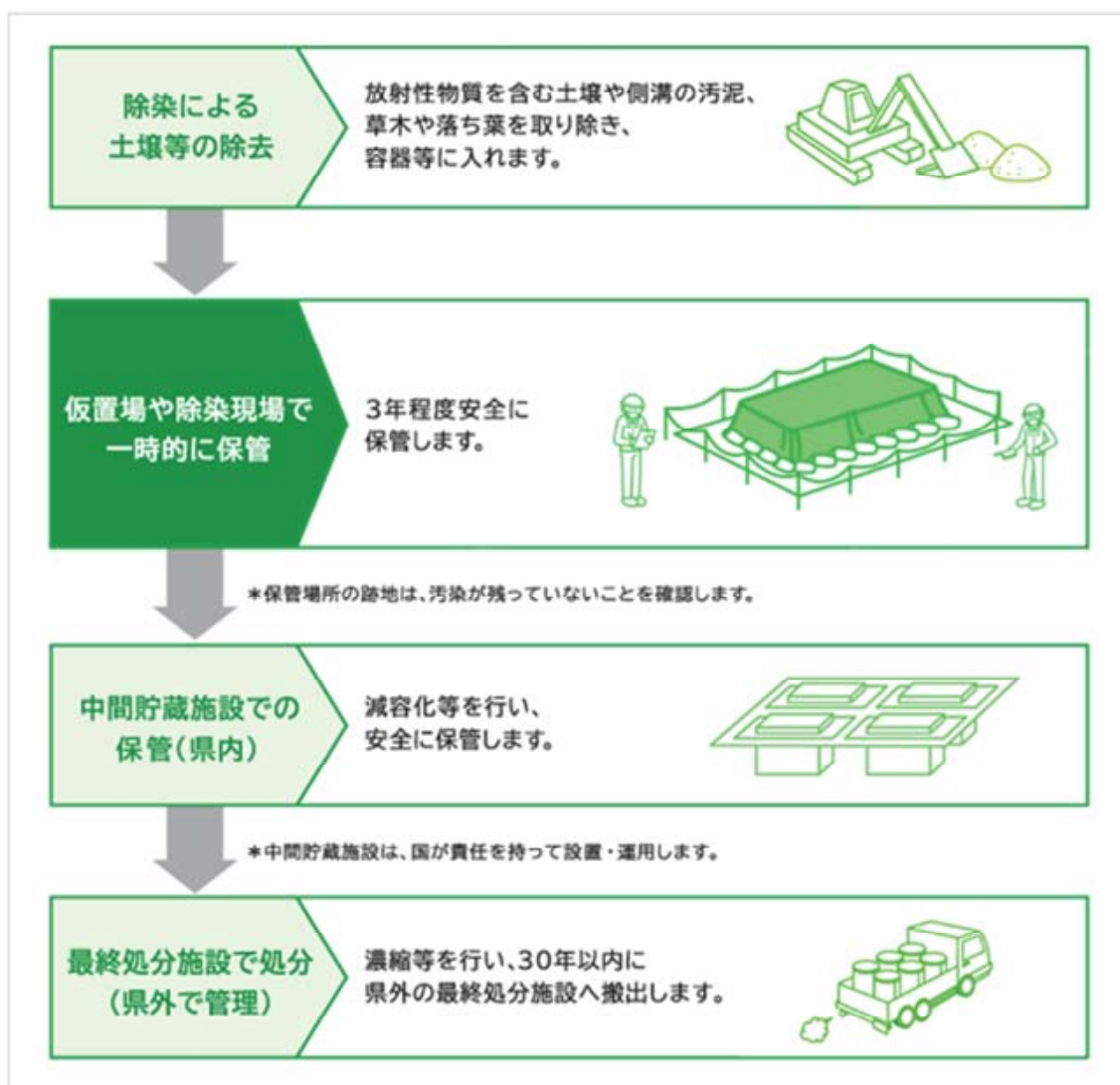


図-3 除染で取り除いた土壌等の処理の流れ

出典：環境省 HP：除染で取り除いた除去土壌等の処理の流れ

[http://josen.env.go.jp/soil/storage\\_procedure.html](http://josen.env.go.jp/soil/storage_procedure.html)

放射性物質の汚染された廃棄物・土壌等は、「特定廃棄物」と「除染に伴う土壌・廃棄物」に大別される（図-4）。

特定廃棄物は、福島県内では「対策地域内廃棄物（環境大臣が汚染廃棄物対策地域として指定した警戒区域・計画的避難区域の廃棄物）」と「指定廃棄物（上下水道の汚泥、焼却施設の焼却灰などの<sup>134</sup>Cs及び<sup>137</sup>Csの放射性物質濃度の合計が8,000 Bq/kgを越える廃棄物）」に区分される。

また、除染に伴う土壌・廃棄物は、その名のとおり除染によって生じるものである（総称して「除去土壌等」とされる）。

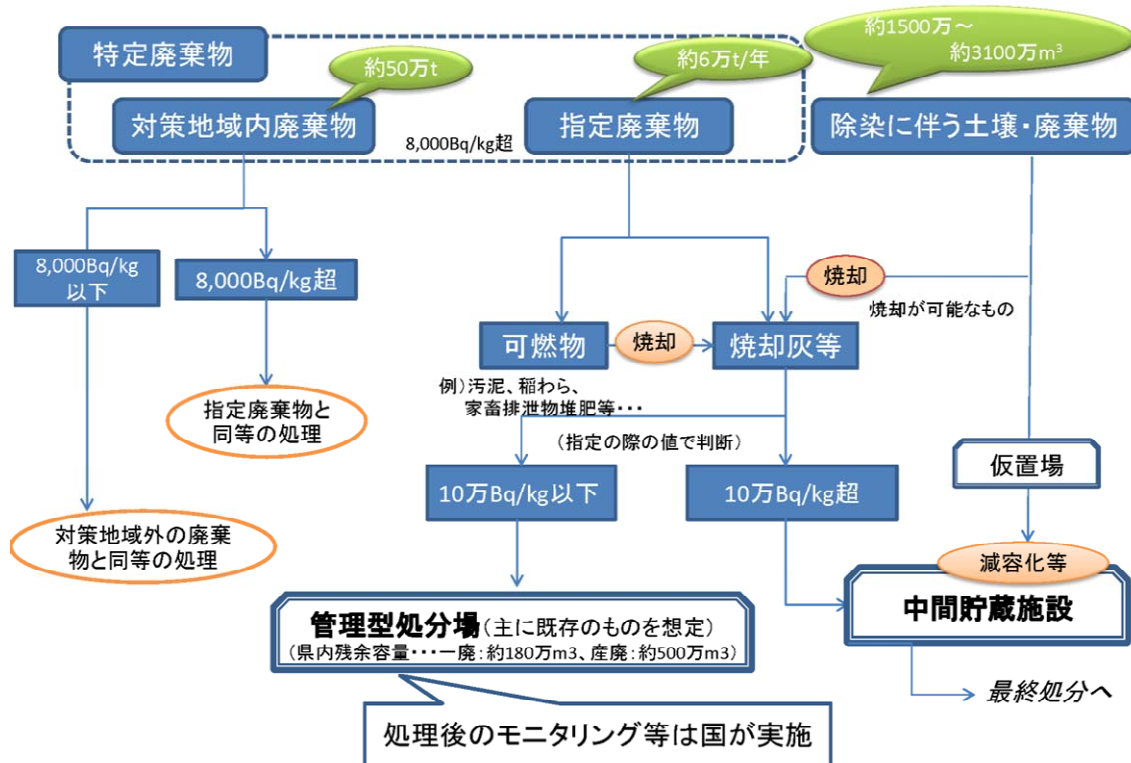


図-4 特定廃棄物及び除染に伴う廃棄物の処理フロー（福島県内）

出典：環境省(2011/10/29)：東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について，特定廃棄物及び除染に伴う廃棄物の処理フロー（福島県内）

[http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/roadmap111029\\_a-2.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/roadmap111029_a-2.pdf)

以上のように特定廃棄物にしる，除染に伴う除去土壌等にしる，可燃物は焼却による減容化が前提となっている。したがって，本検討では，主に除去土壌に対する減容化について検討する。

なお，放射性 Cs を含む可燃物を焼却した場合，焼却灰（特に飛灰）中の放射性 Cs は，水に対する溶解度が高いものが多く含まれ，焼却灰の処理については注意が必要となる<sup>注1,2</sup>。

注1：(独) 国立環境研究所(2014/06)：飛灰洗浄技術に関する技術資料（施設性能・設計に係る指針）

[http://www.nies.go.jp/shinsai/flyashwash\\_2014.6.pdf](http://www.nies.go.jp/shinsai/flyashwash_2014.6.pdf)

注2：(独) 国立環境研究所(2014/04/14)：放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分（技術資料：第四版）改訂版

[http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo\\_r4\\_140414\\_all.pdf](http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_r4_140414_all.pdf)

これに比較して土壌中に含まれる放射性 Cs は、粘土鉱物に強く吸着しており、この特性を踏まえた減容化手法を検討する必要がある（放射性 Cs の土壌への吸着特性に関する研究については、別途委託研究範囲となるため、本稿では最近の研究成果の一例を紹介する<sup>注1,2</sup>。

注1：(独) 日本原子力研究開発機構, (共) 高エネルギー加速器研究機構, (一財) 電力中央研究所, (国) 山形大学(2014/10/31)：福島が僅かなセシウムの取り込みにより多量のセシウムを呼び込むメカニズムを解明－放射性セシウムが吸着した粘土鉱物のミクロな構造変化－

<http://www.jaea.go.jp/02/press2014/p14103101/>

注2：(国) 東京大学, (独) 日本原子力研究開発機構(2014/11/10)：福島放射能汚染における土壌中の放射性微粒子の特定と微粒子中の放射能分布の解明

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2014/50.html>

中間貯蔵における除去土壌量の低減を計ることを目的とした、除染による除去土壌の減容化手法は、以下の様に大別できる。

- ① 除染時における除去土壌量の低減（仮置き前）  
攪拌希釈，反転耕（天地返し），現場保管，転用（道路盛土内）など
- ② 除染により発生した放射性物質汚染土壌量の低減（中間貯蔵前または中間貯蔵中）  
分級（分別），分離，除去など

なお、① 除染時における除去土壌量の低減については、技術として既に確立され、現に実施されているものであり、技術開発動向の調査対象とは異なることから、技術マニュアル等の参考を示すのみとする<sup>注1,2,3</sup>。

注1：農林水産省(2012/03/02)：農地土壌の放射性物質除去技術（除染技術）作業の手引き 第1版

<http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/120302.htm>

注2：福島県農林水産部(2014/02)：水田における除染のための「反転耕」作業技術マニュアル

<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/53898.pdf>

注3：(独) 日本原子力研究開発機構：反転耕による農地の除染方法，除染技術情報及び 農地の除染方法

<http://c-navi.jaea.go.jp/ja/remediation-work/2013-04-10-03-58-46/agricultural-land/agricultural-land-61-2.html>

### 3. 減容化手法の技術動向の検討及び課題点の抽出

減容化は、不要物の容積（体積）を減じることが主目的であり、不要物全体を減容化させる技術（不要な状態）、不要物の一部を有用物として分離（抽出）する技術、不要となる要因（汚染物質）そのものを分解・抽出する技術等がある。

除去土壌の減容化に関する技術としては、①分級、②洗浄、③焼却、④溶融に分類できる。減容化は、仮置場から中間貯蔵施設に運搬され、土壌貯蔵施設Ⅰ型ないしはⅡ型に保管される前に実施されることが基本となる<sup>注1</sup>。ただし、除去土壌量が膨大なことから、中間貯蔵後に減容化処理が実施されることも想定される<sup>注2</sup>。

注1：中間貯蔵施設での除去土壌の保管量（福島県内）

8,000 Bq/kg 以下	：約 1,006 万 m <sup>3</sup>	⇒ 土壌貯蔵施設Ⅰ型
8,000 Bq/kg 超～10 万 Bq/kg 以下	：約 1,035 万 m <sup>3</sup>	⇒ " Ⅱ型（A, B）
（ただし、特定有害物質汚染土壌は、全てⅡ型で保管）		
10 万 Bq/kg 超	：約 1 万 m <sup>3</sup>	⇒ " Ⅱ型（A, B）

注2：現段階で中間貯蔵施設に設置される計画の減容化施設は以下のとおり

減容化施設は中間貯蔵施設に搬入された可燃物を焼却・減容化する施設である。事故由来放射性物質に汚染された廃棄物の焼却については、放射性物質汚染対処特措法等に基づく基準が整備されていることから、これらの既存の基準に沿って行うことを原則とする。具体的には、廃棄物の飛散・流出を防止するために必要な構造とすることや、燃焼室については、燃焼ガスの温度が十分高温な状態（摂氏 800 ° C 以上）で燃焼することができるものを設けること、事故由来放射性物質を除去する排ガス処理設備（バグフィルター等）を設けることとする。

出典：中間貯蔵施設等福島現地推進本部(2013/12)：除去土壌等の中間貯蔵施設の案について

[https://josen.env.go.jp/soil/pdf/draft\\_131214.pdf](https://josen.env.go.jp/soil/pdf/draft_131214.pdf)

#### **分級法**

分級法は、第二種特定有害物質（重金属等）による土壌汚染が砂・礫（粗粒分）に比較して粘土・シルト分（細粒分）において濃度が高い（吸着されている）ことに注目した技術であり、放射性 Cs についても同様の傾向が認められていることから適用されている。

粘土・シルトなどの細粒分を篩などにより分離・分別し、除去土壌を減容する方法である。分級には水中における沈降差を利用する湿式分級と、篩分けを行う乾式分級がある。湿式法は、分離性能がよいが、汚染水などの副次的な廃棄物が多くなる。これに対し、乾式法は、粗分離ではあるものの、副次的な廃棄物が発生しない利点があり、粒径による分画において、所定の放射性物質除染効果が得られれば有効な手法である。

ただし、粗粒分（非汚染土）として分級した土壌の放射性物質濃度がクリアランスレベル（100 Bq/kg 以下）まで低下する技術が確立されていないのが現状である。

特定有害物質による土壌汚染への適用では、細粒分を廃棄物として最終処分する費用の点から、細粒分含有率 30%以下が目安とされているが、放射性 Cs の分級については、中間貯蔵の減容化の観点からは、細粒分含有率よりも利用可能な粗粒分を得られるかが重要な課題となっている。

### **洗浄法**

洗浄法は、除去土壌を高圧水や、水や化学的溶媒への浸漬により、可溶性成分を溶解し、また、極細粒分を懸濁させて中～粗粒分から分離し、濾過等の固液分離により固体を回収して、減容化を図る技術である。放射性 Cs が溶解し、また、放射性 Cs が付着した極細粒分は分離されるので、本方法による除染効果がみられるものの、回収される有用物（中～粗粒分）は含水率が高く、乾燥等による土質工学的な改質処理が必要となる。また、排出される洗浄液中には放射性 Cs が濃縮されているので、吸着・分離する汚染水処理が必要となる。

### **焼却法**

焼却法については、高温焼却法と低温焼却法の技術がある。

#### 高温焼却法

高温焼却法は、除去土壌を空気中において 1000 ° C 程度の加熱（重油燃焼等）により可燃成分を燃焼させるもので、含有水分や揮発性酸化物が揮発することにより減容する。放射性 Cs の揮発は抑制されるものの、燃焼温度や条件によっては、飛散し、焼却炉上部等を汚染する可能性がある。焼却炉として普及しており、大量の除去土壌の処理が可能である。

本来、除染廃棄物のうち有機性廃棄物に適用される技術であるが、除染にあたっては地表から 5 cm 程度の掘削しか行わないため、草本や腐植土等の有機物の混入があることから、適用可能技術と考えられる。

#### 低温焼却法

低温焼却法は、600～800 ° C において木本等を還元雰囲気において燃焼することにより、炭化を図り、減容を図る方法である。除去土壌中の炭素分、水素分が揮発除去されるため、減容率は低く、放射性 Cs の揮発は抑制されるため、二次汚染物は発生しない。しかし、一方で放射性 Cs が濃縮するため、除去土壌の放射性物質濃度が高まり、取扱量は減るものの、取扱方法、保管方法等の対応が必要となる。特に、8,000 Bq/kg を基準として、対応が変わってくるので注意する必要がある。

本来、除染廃棄物のうち有機性廃棄物に適用される技術であり、除去土壌に草本や腐植土等の有機物が大量に混入していないと減容効果が低い技術である（むしろ、土砂が混入した除染廃棄物として扱われる可能性が高い）。

### 溶融法

溶融法は、プラズマ加熱等により固体状の廃棄物を超高温（1200 ° C 以上）に加熱して、減容を図る方法であり、放射性 Cs がほとんど揮発し、除染効果は大きく、安定な溶融固化物が得られる。しかし、炭酸塩等まで揮発させるため、残渣量が少なく、溶融固化物は、ガラス状になるため、本来の土壌としての再利用は不可能である。一方で揮発・回収された副次的廃棄物が多く発生し、その処理が必要となることや揮発した放射性セシウムの濃度が極端に高くなり取り扱いが難しくなる可能性もある。さらに超高温における作業性や、加熱費を考慮すると、大量の汚染廃棄物処理への適用は難しい。

### 再利用可能土砂の課題

減容化手法により再利用可能な土壌が得られた場合、利用可能な土壌の放射性物質濃度が確立されていない課題点がある。

放射性物質濃度がクリアランスレベル（100 Bq/kg）以下であれば用途に問題はないが、現在の減容化技術から取り出される再利用可能土砂の放射性物質濃度ではクリアランスレベル以下を確保することは難しいのが現状である。

参考のために、現在設定されている土木資材等の基準の一覧を示す（表-2）。

表-2 土木資材等に関する基準一覧

対象物<制定機関>	基準（指標）	制定年月日
調理加熱用の薪及び木炭の当面の指標値 <sup>1)</sup> <農林水産省>	薪 40 Bq/kg 木炭 280 Bq/kg	2011/11/02
砕石及び砂利の出荷基準 <sup>2)</sup> <経済産業省>	100 Bq/kg	2012/03/22 2012/04/10
脱水汚泥等を利用した副次産物の利用 <sup>3)</sup> <原子力災害対策本部>	100 Bq/kg	2011/06/16
福島県内における公共工事における建設副産物の再利用等に関する当面の取扱いに関する基本的考え方 <sup>4)</sup> <原子力災害対策本部>  ※覆土 30 cm の場合, 3,000 Bq/kg	1. 下記以外の地域 100 Bq/kg 2. 浜通り・中通り 0.23 μ Sv/h（表面） 3. 遮蔽資材（覆土）等を用いた利用* 10 μ Sv/y	2013/10/25
避難指示区域の公共工事から発生する建設発生土の利用及びアスファルト・コンクリート殻の再利用に関する当面の考え方及び細則 <sup>5)</sup> <福島県>	避難指示区域 0.23 μ Sv/h（表面）	2013/10/30
汚泥肥料中に含まれる放射性セシウムの取扱 <sup>6)</sup> <農林水産省>	200 Bq/kg	2011/06/24
放射性物質が検出された下水汚泥・浄水発生土をセメント原料として利用する際の許容濃度 <sup>7)</sup>	200 Bq/kg	2011/06/16

<厚労省>		
肥料・培土・土壌改良資材の暫定許容値 <sup>8)</sup> <農林水産省>	400 Bq/kg	2011/08/01
災害廃棄物(コンクリートくず等)の再生利用 <sup>9)</sup> <環境省>	遮蔽資材(覆土)等を用いた利用* 10 $\mu$ Sv/y ※地表面から30cmの厚さを確保する場合 3,000 Bq/kg	2011/12/27
稲の作付に関する考え方(水田土壌) <sup>10)</sup> <農林水産省>	5,000 Bq/kg	2011/04/08
指定廃棄物の指定基準 <sup>11)</sup> <環境省>	8,000 Bq/kg	2011/12/14
除染電離則(汚染土壌等) <sup>12)</sup> <厚生労働省>	10,000 Bq/kg	2011/12/22

出典：

- 1) 調理加熱用の薪及び木炭の当面の指標値，農林水産省  
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/tokuyou/shintan1.html>
- 2) 砕石及び砂利の出荷基準，経済産業省  
[http://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/mono/jyutaku/investigation.html](http://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/jyutaku/investigation.html)
- 3) 脱水汚泥等を利用した副次産物の利用，原子力災害対策本部  
<http://www.meti.go.jp/press/2011/06/20110616006/20110616006.html>
- 4) 福島県内における公共工事における建設副産物の再利用等に関する当面の取扱いに関する基本的考え方，原子力災害対策本部  
[http://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima\\_byproduct131025a.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima_byproduct131025a.pdf)  
[http://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima\\_byproduct131025b.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima_byproduct131025b.pdf)
- 5) 避難指示区域の公共工事から発生する建設発生土の利用及びアスファルト・コンクリート殻の再利用に関する当面の考え方及び細則，福島県  
[http://wwwcms.pref.fukushima.jp/download/1/kensetuhasseido\\_meyasu01.pdf](http://wwwcms.pref.fukushima.jp/download/1/kensetuhasseido_meyasu01.pdf)  
[http://wwwcms.pref.fukushima.jp/download/1/as-co-gara\\_meyasu01.pdf](http://wwwcms.pref.fukushima.jp/download/1/as-co-gara_meyasu01.pdf)
- 6) 汚泥肥料中に含まれる放射性セシウムの取扱，農林水産省  
[http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k\\_hiryo/caesium/](http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_hiryo/caesium/)
- 7) 放射性物質が検出された下水汚泥・浄水発生土をセメント原料として利用する際の許容濃度，厚労省  
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001fxly-att/2r9852000001g27y.pdf>
- 8) 肥料・培土・土壌改良資材の暫定許容値，農林水産省  
<http://www.maff.go.jp/j/syouan/soumu/saigai/shizai.html>
- 9) 管理された状態での災害廃棄物(コンクリートくず等)の再生利用，環境省  
<http://www.env.go.jp/jishin/attach/concrete-waste111227.pdf>

10) 稲の作付に関する考え方(水田土壌), 農林水産省

[http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/ine\\_sakutuke.html](http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/ine_sakutuke.html)

11) 指定廃棄物の指定基準, 環境省

<http://www.env.go.jp/jishin/rmp.html#act>

12) 除染電離則(汚染土壌等), 厚生労働省

<http://www.maff.go.jp/j/syouan/soumu/saigai/shizai.html>

※「管理された状態での災害廃棄物(コンクリートくず等)の再生利用」および「福島県内における公共工事における建設副産物の再利用等に関する当面の取扱いに関する基本的考え方」において用いられている 3,000 Bq/kg における 30 cm 覆土の根拠は、「管理された状態での災害廃棄物(コンクリートくず等)の再生利用」において検討された、「道路際における生活環境において年間追加被曝線量 10  $\mu$  Sv 以下となる覆土厚と放射性物質濃度との関係」から求められた例示であり、より高い濃度におけるより厚い覆土等の対応が可能となっていることに留意する必要がある。

現段階では、表-2 のような基準が用いられており、除去土壌についても浄化土壌として一般環境で使用する場合、100 Bq/kg が目安になってしまう可能性が高い(現在の基準値は、「福島県内における公共工事における建設副産物の再利用等」に限られているが、100 Bq/kg はクリアランスレベルであり、福島県外でも十分適用可能と推定される)。

今後、有効な減容化手法を検討するにあたっては、発生土としての基準が明確になることが重要である。

#### 4. 減容化手法の解説文作成

減容化手法について、一般市民に分かり易い解説文が必要となる。

(一般市民向けの解説では、除染時における除去土壌量の低減 [ 攪拌, 反転耕, 現場保管, 転用など ] については、触れていない。)

—福島県内の場合—

除染に伴って発生したものは、大きく土壌と廃棄物に区分され、各々フレコンバックに詰められて、除染地区の近隣で仮置きされます。

これらは、2~3年の後、中間貯蔵施設に集積され、約30年間保管された後、最終処分される計画です。

中間貯蔵施設に保管される前に、廃棄物のうち、焼却可能なものは減容化する目的で焼却され、焼却灰になります。

放射性物質汚染土壌は、「除去土壌」と呼ばれており、福島県内での発生量は、およそ1,500~2,000万 $\text{m}^3$ もの体積になります。この体積は、東京ドームの12~16個分に相当し、この東日本大震災により発生し、宮城県で処理された災害廃棄物等1,870万 $\text{m}^3$  (災害廃棄物: 1,111万 $\text{m}^3$ +津波堆積物: 759 $\text{m}^3$ ) に匹敵するものです。

したがって、除去土壌も体積を減らす努力が必要です。体積を減らすことを「減容化」と言います。

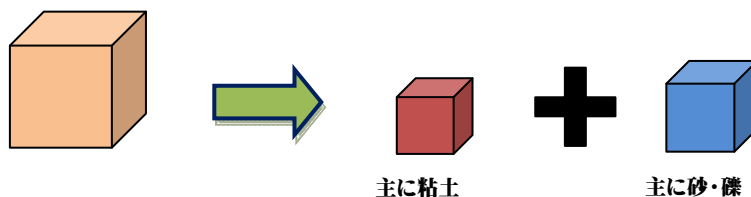
除去土壌の減容化には、大きく3つの方法があります。

##### ①除去土壌全体の体積を減容化する



※除去土壌の中に草や木が多く入っていた場合、可能です。減容化技術としては、「焼却」があります。焼却は、確立された技術であり、比較的大量な処理が可能です。ただし、不燃物がほとんどの場合は、減容化効果はあまり期待できません。

##### ②除去土壌を放射能汚染土と非汚染土に分離する。



※除去土壌は、全ての土粒子が同じように放射性物質で汚染されているわけではありません。放射性物質は、「粘土」に代表される細かい粒子に多く、「砂や礫」のような大きな粒子にはほとんど着いていません。そこで、大きな粒子と小さな粒子に分離する方法があります。この方法を「分級」と呼んでいます。

また、放射性物質は、土壌粒子の表面に多く着いていることから、水や除去効果の高い溶液で放射性物質を洗い出す方法があります。この方法を「洗浄」と呼んでいます。取り出された、砂・礫は、通常の土壌として利用可能です。

ただし、除去土壌中に細かい粒子が多いと利用可能な砂・礫が少量しか取り出せないため減容化効果はあまり期待できません。

### ③除去土壌を放射能汚染土と非汚染土に分離する。



※福島第 1 原発の事故により放出された放射性物質は、セシウムという元素です。セシウムは、金属の中では水銀の次に揮発しやすい元素です(およそ 640 °C 程度)。この性質を利用して、除去土壌を 1,200 °C 以上に加熱して土壌を融解し、気化した放射性セシウムのみを回収する方法があります。この方法によってできた熔融固化物(黒いガラス状のもの)には、放射性セシウムを全く含みません。

ただし、熔融固化物は、土壌の特性はな無くなってしまいますので、道路の碎石等、別の用途に使用することになります。

## 5. 減容化手法に関する用語解説の作成

減容化の解説にあたっては、解説に使用する用語解説も必要となる。

### 放射性セシウム(ほうしゃせい せしうむ)

原子炉などにおけるウラニウムの核分裂反応で形成される元素の 1 つです。放射線を発生させる主要なセシウムであるセシウム 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) とセシウム 134 ( $^{134}\text{Cs}$ ) を総称して「放射性セシウム」と呼んでいます。放射性セシウムは、崩壊する時に高エネルギーのベータ ( $\beta$ ) 線とガンマ ( $\gamma$ ) 線という放射線を放出します。特にガンマ線は物質の透過能力が高いため、福島地域の高放射線量の主要な源となっています。またセシウム 137 が半分に減少する時間(半減期)が 30.2 年であることから、今後長期にわたってガンマ線を放出し続けることとなります。

### 除染(じょせん)

放射性物質の除染は、生活する空間において受ける放射線量を減らすために、放射性物質を取り除いたり、土で覆ったりすることです。今回の福島第一原発事故では、主に大気に放出された放射性セシウムが、前線に伴う降雨とともに地表面に降下しました。また、放射性セシウムは、土壌に強く吸着しやすい性質があることから、表土に沈着している状態です。また、森林や家の屋根に降下した放射性セシウムは、徐々に表土に移行しています。

#### ※取り除く(除去)

放射性物質が沈着した表土の削り取り、枝葉や落ち葉の除去、建物表面の洗浄等により放射性物質を生活圏から取り除くことです。

#### ※さえぎる(遮へい)

放射性物質を土やコンクリートなどで覆うことで、放射線を遮ることができます。この結果として空間線量や被ばく線量を下げることができます。

#### ※遠ざける

放射線の強さは、放射性物質から離れるほど弱くなります。このため、放射性物質を人の生活圏から遠ざければ、人への被ばく線量を下げることができます。また、放射性物質のそばにいる時間を短くすることも「遠ざける」こととなります。

(参考：環境省 HP)

[http://josen.env.go.jp/about/method\\_necessity/decontamination.html](http://josen.env.go.jp/about/method_necessity/decontamination.html)

### 粘土(ねんど)

土壌など地表面の地盤を構成する粒子のうち、0.005 mm 以下の土粒子を「粘土」と呼んでいます。また、粘土より少し粒径が大きくなる 0.005~0.075 mm の粒子を「シルト」と呼びます。粘土やシルトの中には、粘土鉱物と呼ばれる結晶が多く含まれています。

粘土鉱物は、無機・有機のイオンを一時的に保持したり、それらのイオンを他のイオンと交換したりする性質を持っています。放射性セシウムもこの粘土鉱物（特にバーミキュライトと呼ばれる粘土鉱物）に強く吸着されていると考えられています。

### 砂・礫(すな・れき)

地表面の地盤を構成する粒子のうち、0.075～2 mm の粒子を「砂」と呼んでいます。また、2 mm よりも大きな粒子は、「礫」と呼ばれています。砂や礫は、硬い岩石が粒子となったものが多く、粘土鉱物はあまり含まれていません。このため、粘土やシルトを取り除いた土壌では、放射性セシウムが含まれている量がわずかとなるため、放射線量が小さくなります。なお、砂や礫の表面に粘土が付着していることがあり、この場合、この粘土を取り除かないと放射線量が下がらないこともあります。

### バーミキュライト(ばーみきゅらいと)

花崗岩（墓石などによく用いられるみかげ石）中に含まれる黒雲母という鉱物が風化・変質して生成したものがよく知られている粘土鉱物の1つです。層状の結晶構造をもち、水を含むと膨らむ性質（膨潤性）があります。また、層状構造の間にセシウムを吸着しやすいことが分かっています。福島県では、阿武隈山地を主体に花崗岩が広く分布しており、比較的土壌中にバーミキュライトが多く含まれている地域です。

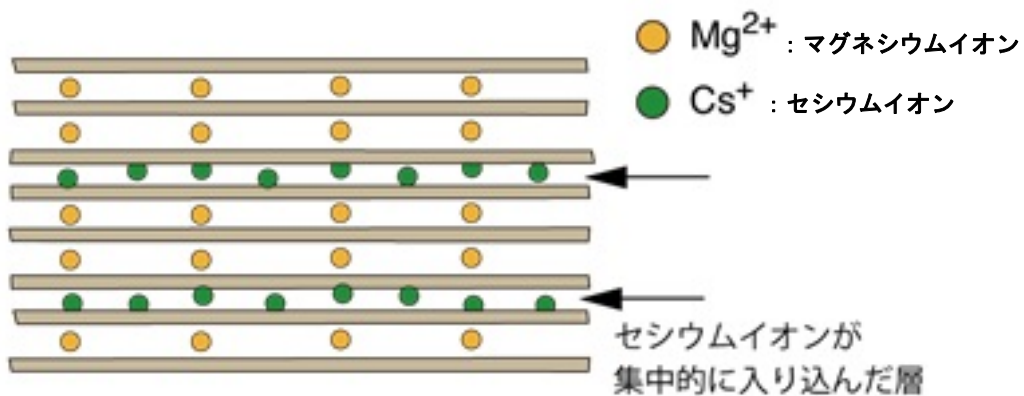


図- セシウムイオンがバーミキュライトの層構造に吸着している状態のイメージ

出典：日本原子力研究開発機構，高エネルギー加速器研究機構，電力中央研究所，山形大学（2014/10/31）：福島が僅かなセシウムの取り込みにより多量のセシウムを呼び込むメカニズムを解明－放射性セシウムが吸着した粘土鉱物のミクロな構造変化－

<http://www.jaea.go.jp/02/press2014/p14103101/02.html>

## 6. 減容化技術情報の一般公開に向けたスキームの作成

中間貯蔵に向けた除去土壌の減容化技術は、福島第一原発の事故後、多くの実験的な検討が実施されている。ただし、適用に関する統一的な整理や課題点の整理は、十分に行われおらず、技術を採用する側や技術情報を得ようとする側にとっては、集約された情報源の存在が望まれる。

### **情報公開の対象**

集約された減容化技術情報の公開対象およびその目的としては、以下が考えられる。

- ①福島県等，地方自治体の業務発注者（技術支援）
- ②一般市民（リスクコミュニケーション又はリテラシーの向上）

ただし、放射性物質汚染土壌と非汚染土壌の閾値が確定していない現段階では、技術の適応性が十分に評価できない課題も存在している。特に、分離・分級された非汚染土壌の利用用途の可否が決められない問題が大きい。

### **情報の公開方法**

情報の公開にあたっては、書籍等による公開とホームページを用いた公開が考えられる。書籍等による情報の公開は、新たな情報の更新が難しいことから、ある程度熟成した技術情報に適している。減容化技術は、技術が進歩している途中であり、常に情報が追加されていく（データが日々更新される）段階であることから、基本的には、ホームページ（HP）として公開することが妥当と考えられる。

なお、HPにおいて情報を公開するにあたっては、早期に公開することが望ましく、現段階の技術情報の集約状況では、段階を踏んだ公開が望ましい。

段階的な HP 公開のイメージとして以下の 3 段階が考えられる。

#### 第 1 段階：情報源情報の公開

- 減容化情報の公開の目的
- 減容化手法の考え方と分類
- 文献情報源情報
- プロジェクトの目的およびメンバーなど

#### 第 2 段階：技術情報サイトの追加

- 文献情報データベースの公開
- 関連情報（除染・中間貯蔵など）の整備
- NIMUS 研究成果等オリジナルティの高くないコンテンツの追加（直接リンク）

#### 第 3 段階：技術登録・検索システムの公開

- 減容化技術登録システムの公開

## 放射性物質汚染土壌の減容化に関する技術情報

HOME

減容化技術

技術情報

関連情報

基礎知識

用語解説

FAQ

リンク



新着情報

○月○日：○○○○○

トップページのイメージ

放射性物質汚染土壌の減容化に関する技術検討委員会（仮）

所在：○○

コンテンツの一覧

○○ ○○ ○○

セキュリティポリシー

## 放射性物質汚染土壌の減容化に関する技術情報

各コンテンツとその階層

1. HOME
  - 1.1 イメージ画像（スライドショー）
  - 1.2 新着情報
2. 減容化技術
  - 2.1 技術委員会の目的
  - 2.2 減容化技術の概要
3. 技術情報
  - 3.1 減容化技術の解説
    - 3.1.1 廃棄物の減容化
    - 3.1.2 除去土壌の減容化
  - 3.2 文献情報（情報源データベース）
  - 3.3 文献情報（文献データベース）
  - 3.4 登録技術
    - 3.4.1 登録技術の審査
    - 3.4.2 登録技術（データベース）
  - 3.5 適用事例情報
4. 関連情報
  - 4.1 除染・仮置に関する情報（国，自治体）
  - 4.2 中間貯蔵に関する情報
5. 基礎知識（減容化メカニズム）
  - 5.1 放射性セシウム
  - 5.2 粘土鉱物とセシウム
  - 5.3 減容化基礎データ
  - 5.4 ○○
6. 用語解説
7. FAQ

放射性物質汚染土壌の減容化に関する技術検討委員会（仮）

所在：○○

コンテンツの一覧

○○ ○○ ○○

セキュリティポリシー

HOME（トップページ）は、早期に公開するものになるため、その構成は早急に決定する必要がある。なお、HPの作成・更新については、HTMLの知識が無くてもWebサイトを構築できるコンテンツマネジメントシステム〔CMS〕の利用が好ましい。

第一段階で提供するコンテンツ

第二段階で提供するコンテンツ

第三段階で提供するコンテンツ

1. HOME
  - 1.1 イメージ画像（スライドショー）
  - 1.2 新着情報
2. 減容化技術
  - 2.1 技術委員会の目的
  - 2.2 減容化技術の概要
3. 技術情報
  - 3.1 減容化技術の解説
    - 3.1.1 廃棄物の減容化
    - 3.1.2 除去土壌の減容化
  - 3.2 文献情報（情報源データベース）
  - 3.3 文献情報（文献データベース）
  - 3.4 登録技術
    - 3.4.1 登録技術の審査
    - 3.4.2 登録技術（データベース）
  - 3.5 適用事例情報
4. 関連情報
  - 4.1 除染・仮置に関する情報（国，自治体）
  - 4.2 中間貯蔵に関する情報
5. 基礎知識（減容化メカニズム）←NIMUS 研究成果等
  - 5.1 放射性セシウム
  - 5.2 粘土鉱物とセシウム
  - 5.3 減容化基礎データ
  - 5.4○○
6. 用語解説
7. FAQ

なお、当初公開する3.2文献情報（情報源データベース）については、論文・学会発表等の公刊文献または、公的・準公的機関のプレスリリースとし、紀要や社内論文等も可能とする程度が好ましい（執筆者責任となる情報）。また、データベースとしては、早期公開の観点からハイパーリンクが可能な表形式ファイルの公開でも良いと考えられる。

### **情報公開に向けた組織体制等の構築**

減容化技術情報を公開する上では、行政等への情報提供も意図していることから、責任のある組織を構築する必要がある。また、HPを維持・管理するための要員を確保する必要もある。

特に、技術登録制度を立ち上げた場合、その評価に関する要員（有識者委員会）の確保なども含め、運営体制（複数人の専従事務局員）および運営資金の確保が必要となる。

また、公開情報が技術情報であり、使用にあたっての瑕疵に関する責任等の所在についても十分に検討し、その旨をHPで明確にしておく必要がある。

### **情報公開のサイト**

情報公開のサイトは、独立性の観点から新たにドメインを取得主する（例えば、〇〇フォーラムのようなNPO組織を創設して）ことが最も好ましいが、当面の維持管理を想定すると、公平性の高い研究機関（例えば、日本原子力研究開発機構など）のHPにリンクすることが考えられる。

### **情報公開に関する課題点**

減容化情報を発信していく上で、現段階で公表されている計画では、中間貯蔵時に実施される減容化は、可燃性廃棄物のみであり、除去土壌については特に明確になっていない。また、2015年3月11日からパイロット事業として中間貯蔵が開始され、2016年度以降、本格的な中間貯蔵が実施される予定となっている。

したがって、公開情報を何時、誰が、どのような場面で使うことになるのかを明確にするとともに、減容化のメリット、デメリット（特に除去土壌について）および、その判断方法（事前調査方法）についても検討しておく必要がある。

特に、技術登録制度を立ち上げた場合、コストに関する信頼性の責任の所在を明確にしておく必要があるとともに、基本的にプラントが必要となる可能性が高いことから、コストは想定される処理規模に大きく左右されることになることから、ニーズに関する想定を十分に行っておく必要がある。

分級・洗浄による減容化手法は、比較的 low コストで実施可能な技術であることから、最も多く検討が行われている。しかし、減容化により生じた非汚染土を利用することができなければ、技術を適用する価値が無くなってしまふ。したがって、非汚染土の定義（品質基準）および流用方法についても明確にしておく必要がある。

また、減容化技術が適用された事例を公表していくことも重要であり、減容化実施サイト情報、適用事例の概要を逐次アップデートする必要がある。

なお、減容化に関する留意事項（トラブル事例）についてもFAQ等を用いて公開することが望ましい。

### **平成 27 年度以降の課題と方針**

平成 27 年度は、パイロット事業として中間貯蔵が開始されることになっており、減容化技術の普及・啓発は、早期に開始することが好ましい。しかし、前述したように減容化により発生した非汚染土壌の定義が難しいことから、減容化技術の普及には課題点も多い。

参考：建設工業新聞（2015/1/15）

<http://www.decn.co.jp/?p=21663>

### **HP の早期試験公開**

HP（第一段階）については、平成 27 年度 2/4 半期を目途に試験公開し、利用者等の関心度を把握することが好ましい。この時点におけるデータベースは、情報源情報として表形式の一覧表で問題ないと考えられる。ただし、平行して技術情報（公刊文献）のアップデートを行う必要がある。また、第二段階の内容について、平成 27 年度末公開を目標に構築する。

### **HP 公開サイトの検討**

試験公開のサイトとしては、NIMS プロジェクト所属組織のサーバーを用いることが好ましい（例えば、宮崎大学）。この場合、NIMS プロジェクトに関する既設の HP 等にリンクを設定することで、広くアクセスが可能になる。

### **HP 公開運営体制の構築**

技術登録制度の立ち上げ（平成 28 年度以降）に向けて、技術評価の方法、評価要員（有識者委員会）の検討、および運営体制（複数人の専従事務局員）および運営資金の確保を検討する必要がある。

### **平成 28 年度以降の方針**

平成 28 年度は、本格的な中間貯蔵の開始が見込まれており、技術登録制度の運用が開始できることが好ましい。

また、減容化技術については、フォールアウトした放射性 Cs 以外の核種による高濃度放射性物質汚染土壌（福島第一発電所周辺）について検討を開始することが望ましい。